



Valg af afværgе med inddragelse af livscyklusvurdering (LCA)

Lemming, Gitte; Chambon, Julie Claire Claudia; Binning, Philip John; Bjerg, Poul Løgstrup; Hauschild, Michael Zwicky; Margni, Manuele; Bulle, Cécile

Published in:

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer - udfordringer og metoder

Publication date:

2012

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Lemming, G., Chambon, J. C. C., Binning, P. J., Bjerg, P. L., Hauschild, M. Z., Margni, M., & Bulle, C. (2012). Valg af afværgе med inddragelse af livscyklusvurdering (LCA). In *Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer - udfordringer og metoder* (pp. 69-82). ATV Jord og Grundvand.

General rights

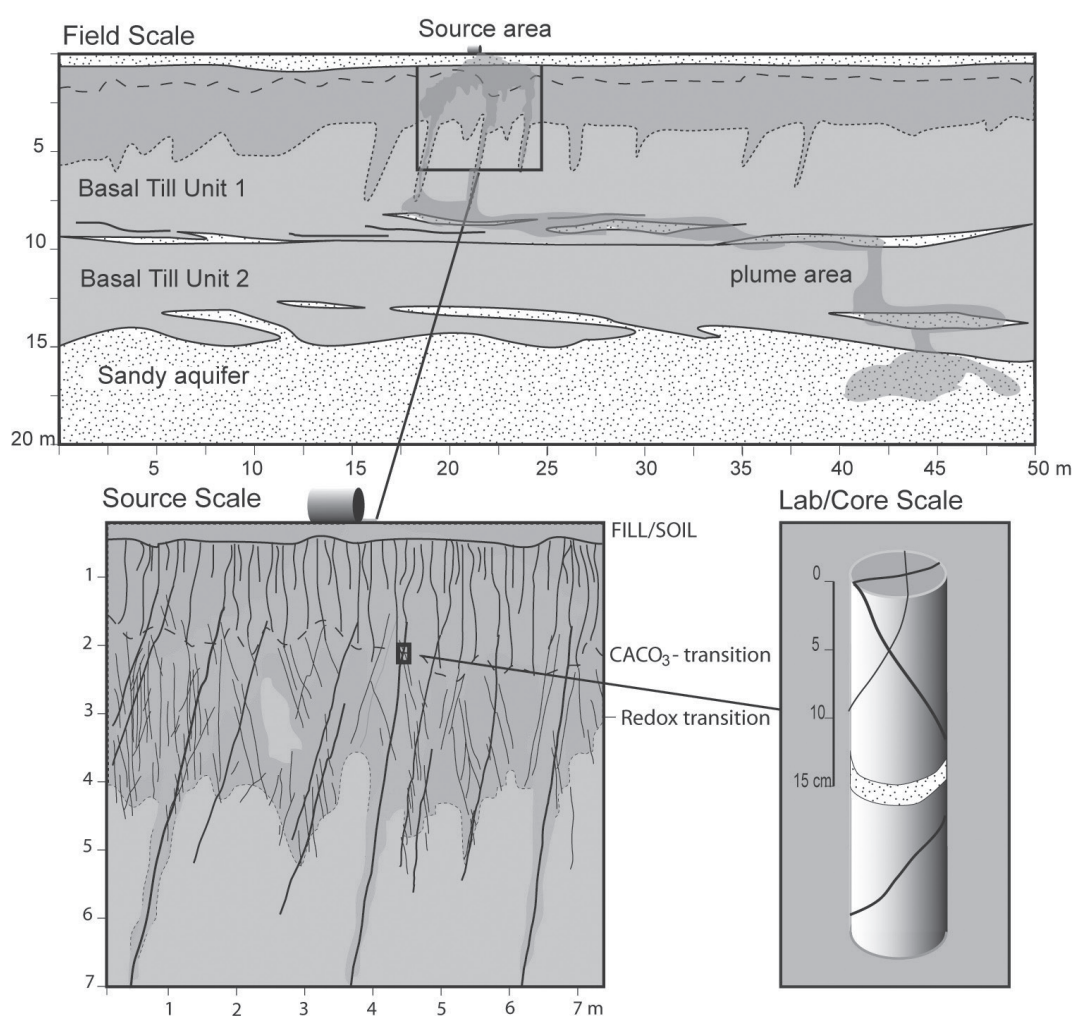
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

RISIKOVURDERING AF FORURENEDE GRUNDE I LAVPERMEABLE AFLEJRINGER - UDFORDRINGER OG METODER

18. januar 2012



Indholdsfortegnelse

	Side
REGIONERNES HOVEDPINE - UNDERSØGELSER OG AFVÆRGE I MORÆNELER Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden et al.	1 - 6
FELTMETODER OG HISTORIK - EN PRÆSENTATION AF REMTEC LOKALITETEN PÅ VADSBYVEJ 16 Civilingeniør, ph.d. Thomas Hauerberg Larsen, Orbicon A/S	7 - 20
GEOLOGISK KARAKTERISERING AF MORÆNELER Seniorforsker Knud Erik Klint, GEUS et al.	21 - 30
HYDROGEOLOGY IN CLAY TILLS Phd student Timo Kessler, DTU Miljø/GEUS et al.	31 - 38
KONCEPTUEL MODEL FOR FORURENINGSFORDELING OG PROCESSER FOR CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER I MORÆNELER. HAR VI ET SAMLET OVERBLIK? Lektor Mette M. Broholm, DTU Miljø et al.	39 - 52
RISK ASSESSMENT IN FRACTURED CLAYEY TILLS – WHICH MODELING TOOLS? Ph.D. student Julie C. Chambon, DTU Miljø et al.	53 - 60
RISIKOVURDERING AF EN PESTICIDFORURENING VED EN GAMMEL FRUGTPLANTAGE Hydrogeolog, ph.d. Peter R. Jørgensen, PJ-Bluetech ApS et al.	61 - 68
VALG AF AFVÆRGE MED INDDRAGELSE AF LIVSCYKLUSVURDERING (LCA) Postdoc Gitte Lemming, DTU Miljø et al.	69 - 82

REGIONERNES HOVEDPINE - UNDERSØGELSER OG AFVÆRGE I MORÆNELER

Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden
Fagleder, cand.mag., Carsten Bagge Jensen, Region Hovedstaden

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUME

Regionerne gennemfører undersøgelser på forurenede grunde af 2 årsager:

1. For at afdække om forureningen udgør en risiko
2. For at gennemføre afværgeforanstaltninger, hvis der er en risiko.

Derfor er undersøgelser et redskab til at nå det egentlige mål, som er at beskytte mennesker og miljø mod påvirkning fra punktkildeforurening.

Moræneler dækker en væsentlig del af Danmarks areal og er en udfordring i forbindelse med undersøgelser og afværge. Remtec har bidraget til at kaste lys over de processer, der foregår i en moræneler. Den viden kan regionerne anvende direkte til at kvalificere grundlaget for at vurdere, om en forurening udgør en risiko og i givet fald, hvorledes risikoen bedst afværges.

FRA EVIGHEDSPROJEKTER TIL KILDEREDUKTION I MORÆNELER

Forurening i moræneler er på grund af dens heterogenitet vanskelig at undersøge, vanskelig at risikovurdere og vanskelig at afværge. Tilbage i tiden var det almindeligt for myndigheder (og andre), at en afværge bestod i at etablere hydraulisk kontrol med en forureningsfane eventuelt i kombination med en mere eller mindre delvis afgravning af forurening i kildeområdet. Man erfarede, at det ofte førte til "evighedsprojekter", fordi restforurening i moræneler i kildeområdet vedblev med at spredes til det underliggende grundvandsmagasin.

For at undgå de dyre "evighedsprojekter" blev opmærksomheden skærpet på forureningen i kildeområdet. Eftersom moræneler indgår i jordpakken på størstedelen af Danmarks areal, endte man oftest i den situation, at moræneler var en væsentlig del af kildeområdet. Med årene erfarede man, at undersøgelserne i moræneler ikke altid udgjorde et tilstrækkelig godt grundlag for afgrænsning af forurening, for bestemmelse af kildestyrke og for valg og design af afværge.

Afgravning har i mange år stået stærkt som afværgemetode i moræneler, men indenfor de seneste 5-10 år er også andre lovende teknikker kommet frem. De mest lovende til kildereduktion i moræneler er varmeteknikker, kemisk oxidation og fjernelse med bakterier (f.eks. stimuleret reduktiv deklorering, SRD).

I samme periode er der kommet en øget fokus på at vælge afværgemetoder under hensyntagen til metodernes bæredygtighed. I udgangspunktet er afværgemetoder som afgravning og termiske projekter i moræneler mere miljøbelastende mht energiforbrug end afværgemetoder som kemisk oxidation og SRD. På dette punkt havde de mindre aggressive afværgemetoder altså en fordel i moræneler fremfor afgravning og termisk oprensning.

HIDTIDIG VIDENSNIVEAU OG UDFORDRINGER

Samtidig med, at afværgemetoder som kemisk oxidation og SRD i moræneleren var meget tiltalende, måtte vi for en ca. 5 år siden erkende, at vidensniveauet om processerne i moræneleren var meget begrænset. Moræneleren var som en "black box". Vi var udfordret både med hensyn til at afgrænse forureningen og bestemme kildestyrken. Det vanskeliggjorde risikovurdering og prioritering af de "rigtige" sager til afværge. Derudover manglede vi viden om og erfaring med effektivitet og tidshorisont for oprensning med de mindre aggressive afværgemetoder som kemisk oxidation og SRD.

Udgangspunktet for ca. 5 år siden og dermed blandt andet for Remtec var manglende viden til at kunne besvare f.eks. nedenstående spørgsmål:

- Kan vi forbedre bestemmelse af kildestyrken i en moræneler?
- Er der andre velegnede undersøgelsesmetoder?
- Hvilke transportprocesser er dominerende i en moræneler?
- Hvor og hvordan foregår nedbrydningen i moræneleren?
- Er nedbrydningen fuldstændig af klorerede ethener og ethaner?
- Hvad er tidshorisonten for kildefjernelse i moræneler med SRD/kemisk ox?
- Hvordan optimeres forureningsfjernelse i moræneler?
- Hvordan dokumenterer vi effekten af oprensning i moræneler?
- Hvor ofte skal der reinjiceres?
- O.S.V., O.S.V., O.S.V.

HVOR ER VI I DAG?

Remtec-projekterne og andre udviklingsprojekter under Teknologipulje og i regionsregi (med stort person sammenfald og dermed stor vidensdeling) har flyttet vores viden om moræneler markant. I dag er der ikke grund til at betragte moræneler som en "black box", for vi er blevet langt klogere på f.eks.:

- de processer, der dominerer transporten i moræneler
- forudsætningerne for at opnå nedbrydning af de klorerede ethener
- at vi ikke opnår fuldstændig nedbrydning af de klorerede ethaner
- at tidshorisonten for oprensning i moræneler kan nedbringes, hvis nedbrydning foregår i hele lermatricen, dog er tidshorisonten stadig lang.
- det er muligt at levere substrat/bakterier/reaktanter i en moræneler, men vanskeligt
- det er næppe muligt med de nuværende teknikker, at opnå en homogen og tæt levering i moræneler
- oprensningstiden medfører behov for adskillelige reinjektioner/behandlinger over en længere årrække
- specifikke undersøgelsesmetoder, som f.eks. direkte måling af bakterieaktivitet
- O.S.V.

Mange af resultaterne præsenteres i løbet af dagen.

Helt konkret medfører det øgede vidensniveau om moræneler, at vi bør have langt flere data i vores forureningsundersøgelser. Geologiens heterogenitet betyder, at vi skal have flere målepunkter, for at kunne bestemme kildestyrke, vurdere tilstedeværelse af DNAPL og udbredelse af forurening i moræneler. Det er kun økonomisk muligt ved i højere grad at inddrage feltmetoder, hvor prisen per målepunkt er lavere end ved de traditionelle metoder. Selvom data fra feltmetoder er behæftet med større usikkerhed, så er den øgede datatæthed en meget stor hjælp til vurderingen af forureningens styrke og udbredelse. Det er samtidig vigtigt at huske, at feltmetoderne stadig holdes op i mod akkrediterede analyser.

En af side-gevinsterne ved at undersøge moræneleren tættere er, at vi forbedrer grundlaget for risikovurderingen og dermed opnår større sikkerhed i beslutningen om, hvilke forureninger, der skal afværges og hvilke vi kan efterlade. For de sager, der bliver prioriteret til afværge, udgør den større datatæthed et bedre grundlag for design af afværge.

Især afværgemetoden SRD led under manglende viden om processerne i moræneler. Resultaterne fra Remtec og nogle af de andre projekter har kastet lys over dette. Der er i dag ikke tvivl

om, hvilke processer der kan stimuleres i moræneleren. Tilgængæld tyder alt på, at oprensningstiderne i moræneler er lange. Oprensningstiderne kan reduceres maksimalt, hvis der kan gennemføres en tæt og homogen levering i moræneleren, således at fjernelsesprocessen foregår i hele matricen. Pt er det ikke muligt i en tæt moræneler med de metoder, vi kender i dag. Potentialet er muligvis større i en mindre tæt geologi.

Når oprensningstiderne er lange, så øges perioden med monitoring og antallet af reinjektioner og dermed prisen på afværgeprojektet.

Alt i alt er vi altså langt mere sikre på, at vi kan få forskellige nedbrydningsprocesser til at forløbe, men lange oprensningstider i moræneler betyder, at afværgemetoder som SRD og kemisk oxidation i moræneler bliver dyrere og mindre attraktive rent bæredygtighedsmæssigt. Så selv om vi er blevet langt klogere, så er vi stadig udfordret af især leveringsproblematikken i moræneler, men også af lange tidshorisonter for oprensning i moræneler. De mindre aggressive in situ metoder i moræneler kommer altså til at stå svagere i "konkurrencen" med metoder som afgravning og varmeprojekter, på trods af at vi har fået meget mere viden om processerne.

Dertil kommer at vi i nogle tilfælde observerer et vinylklorid problem i grundvandet affødt af en indsats med SRD i moræneler i kildeområdet. Det er en problemstilling, der pt undersøges nærmere i et teknologipuljeprojekt. Det er endnu et aspekt ved SRD i moræneler, der kan få stor betydning for metodens udbredelse.

Pt er potentialet for at anvende SRD/ kemisk oxidation større på lokaliteter, hvor kildestyrken ikke er for høj, hvor moræneleren ikke er for tæt, og hvor risikovurderingen viser, at "man kan leve med" en mindre kildereduktion.

OPSAMLING OG SYN PÅ FREMTIDEN- SET FRA REGION HOVEDSTADENS SYNSVINKEL

Vi vil inddrage undersøgelsemetoder, der giver mange, hurtige og billige feltmålinger for at øge datagrundlaget i kildeområder med moræneler. Med en større datatæthed har vi en mulighed for at forbedre bestemmelsen af kildestyrke og afgrænsning af forureningen på trods af heterogeniteten. Feltdata kan ikke stå alene- der vil også blive udtaget et betydeligt antal prøver til akkrediteret analyse.

Større datatæthed vil på især de store forureningssager øge udgifterne til undersøgelser. Til gengæld mener vi, at en mere tilbunds gående og omfattende undersøgelse giver et bedre grundlag for risikovurderingen, bedre grundlag for prioritering af sager til afværge, for valg af afværgestrategi og for design af afværge. I sidste ende kan en tilbunds givende undersøgelse betyde, at udgifterne til det samlede afværge projekt reduceres.

Moræneler er ikke længere en "black box". Der er i høj grad kastet lys over processer, oprensningstider mm i moræneleren. Tilgængæld må vi erkende, at de mindre aggressive oprensningmetoder som SRD og kemisk oxidation er meget udfordret af problematikken om levering i lavpermeable aflejringer og af, at oprensningstiderne er meget lange, selv hvis leveringen lykkes. Metoderne har måske mere potentiale i den type af sager, hvor geologien ikke er for tæt, og kravene til kildereduktion er mere lempelige. I sager med høj kildestyrke, evt. DNAPL, behov for høj kildereduktion og tæt moræneler er det svært på det foreliggende grundlag at se potentialet i teknikker som SRD og kemisk oxidation. I den type af sager står metoder som afgravning og termiske oprensning langt stærkere.

FELTMETODER OG HISTORIK
- EN PRÆSENTATION AF REMTEC LOKALITETEN PÅ
VADSBYVEJ 16

Civilingeniør, ph.d. Thomas Hauerberg Larsen, Orbicon A/S

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUME

Vadsbyvej 16A præsenteres i et historisk perspektiv, dvs. de udførte aktiviteter er gennemgået kronologisk. Der er reflekteret over metoder, omfang og rækkefølge af de udførte aktiviteter.

INDLEDNING OG BAGGRUND

Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene (herefter bare Vadsbyvej) er en lokalitet, der tidligere har huset en kemikaliefordelingscentral. Region Hovedstaden har forestået flere redegørelser, undersøgelser og afværge på lokaliteten i løbet af en årrække. Herudover har ejendommen været en af de lokaliteter, der er blevet belyst i REMTEC projektet. Ejendommen er således væsentligt bedre undersøgt end mange andre lokaliteter. Til trods for dette har der været overraskelser omkring forureningen på ejendommen, der først er blevet konstateret meget langt inde i forløbet. Denne artikel beskriver de undersøgelser og afværge, der har været foretaget i et historisk perspektiv, og giver ud fra de opnåede resultater refleksioner over de udfordringer, der kan være på ejendomme med sammenlignelig geologi og anvendelse i bred forstand.

FORMÅL

Formålet med artiklen er at give et overblik over de aktiviteter, der er foregået på ejendommen Vadsbyvej for at tilvejebringe en ramme for forståelse af de særlige forhold der gør sig gældende i forhold til undersøgelse og afværge af chlorerede opløsningsmidler på ejendomme med lavpermeable aflejringer, særligt hvor der forekommer mange mindre kilder. Beskrivelsen er primært fokuseret på de undersøgelser, der er udført af rådgivere for Københavns Amt/Region Hovedstaden.

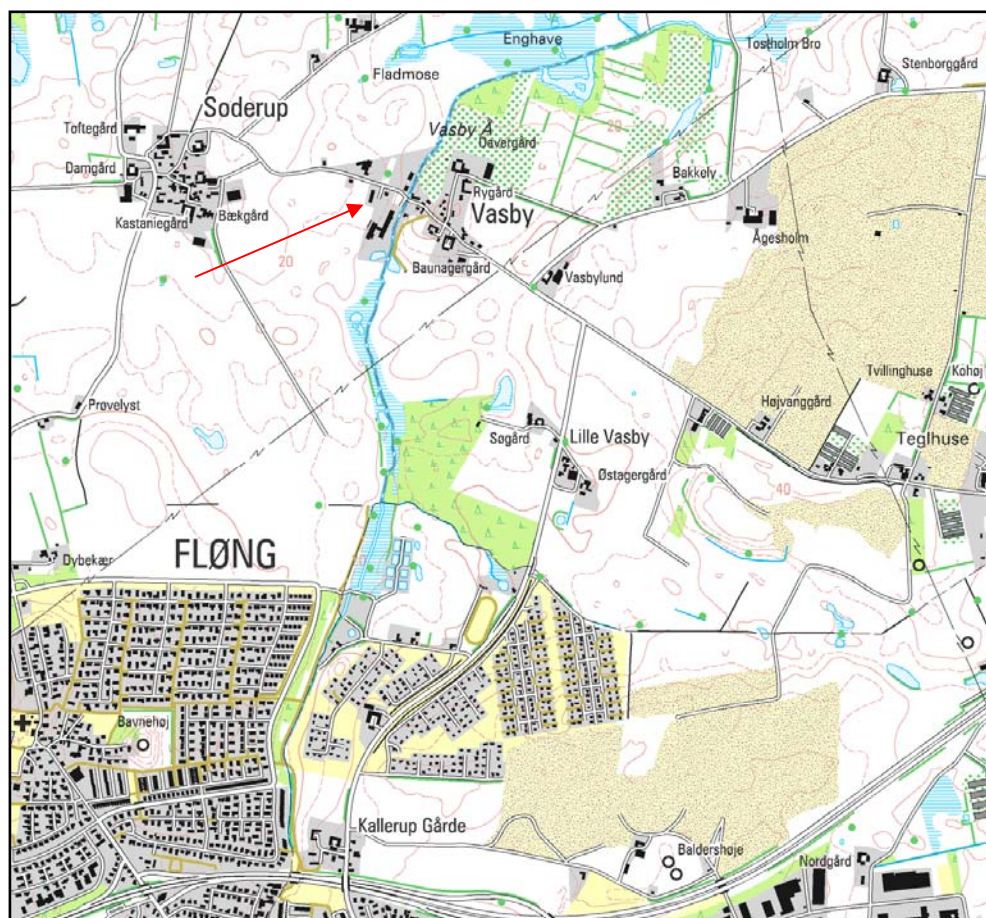
BESKRIVELSE AF LOKALITET OG AKTIVITETER

Vadsbyvej har været i søgelyset i forhold til en indsats mindst siden 2004, hvor Birch og Krogboe udførte en historisk gennemgang af de forurenende aktiviteter på ejendommen for Københavns Amt. I den følgende liste er det forsøgt at give en liste over de forskellige aktiviteter, der er foregået på ejendommen primært i rådgiver regi. Sideløbende har DTU arbejdet med forskellige problem stillinger vedrørende grunden ligeledes finansieret af amt/region. Relevante detaljer er præsenteret i resultatafsnittet.

- 2004 - Birch og Krogboe udfører en historisk redegørelse for ejendommen Vadsbyvej 16A/Bækgårdsvej 5 /1/.
- 2005 - Hedeselskabet udfører en kortlægningsundersøgelse /2/.
- 2005-2006 DTU starter med at undersøge ejendommen som led i et samarbejdsprojekt med Københavns amt..
- 2006 – Carl Bro udfører en omfattende undersøgelse – den første konceptuelle model beskrives (uden at den hed det i rapporten) /3/.
- 2006 – Carl Bro udfører et afværgeprogram /4/.
- 2006 NIRAS udfører supplerende undersøgelser/pilotforsøg med pneumatisk frakturering til spredning af eksempelvis donor i moræneler /5/.
- 2007 – Orbicon udfører en omfattende undersøgelse /6/.
- 2008 REMTEC aktiviteter starter. Der udføres løbende forskellige former for undersøgelse af både geologi, hydrogeologi og forurening.

- 2008 – Orbicon udarbejder et afværgeprogram.
- 2008 – Orbicon udarbejder et skitseprojekt.
- 2008-2009 REMTEC udfører Direct Push Injection og hydraulisk frakturering som test til vurdering af spredning af eksempelvis donor i moræner.
- 2009 – Orbicon udfører en baselinedokumentation forud for termisk oprensning.
- 2010-2011 Krüger udfører ISTD oprensning af to hot-spot på ejendommen. Det konstateres, at der i kanten af det ene hot-spot ikke er så rent som forventet.
- 2011 Orbicon udfører test af forskellige metoder til dokumentation af spredning af væsker fra direct push injection i moræner.
- 2011 – Orbicon udarbejder revideret historik for Vadsbyvej 16a, Bækgårdsvej 1, Bækgårdsvej 5, Bækgårdsvej 6, Bækgårdsvej 19a, der enten har huset samme eller lignende aktiviteter med samme ejer som Vadsbyvej 16a.
- 2011 – Orbicon udfører sammen med Fugro yderligere undersøgelser. Revideret konceptuel model opstilles.
- 2011 – Arkil udfører graveprojekt i yderligere tre hot-spot.
- 2012 – Afholdelse af dette foredrag.

Den omtrentlige placering af ejendommen fremgår af figur 1.



Figur 1. Oversigtskort med ejendommens placering. Skala 1:25.000. Gengivet efter aftale med KMS.

RESULTATER

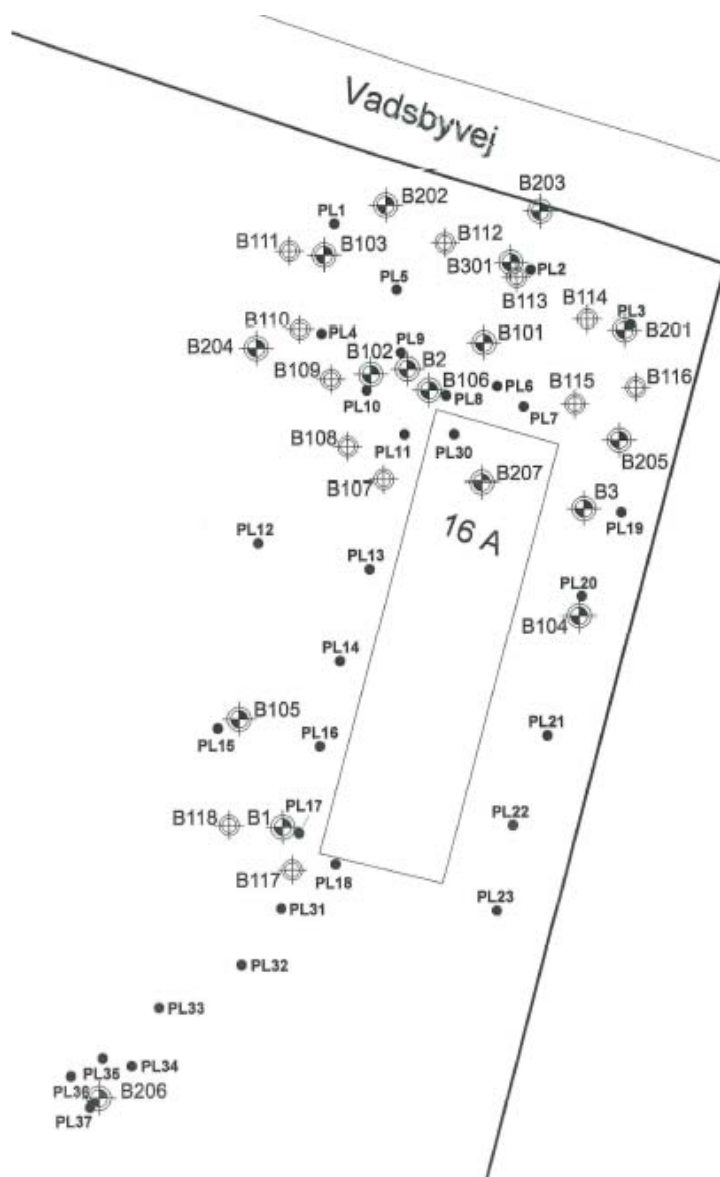
I den indledende historik for ejendommen /1/ blev det fastslået, at der blev opført en ladebygning på ejendommen i 1970. Fra 1973-1976 blev der drevet, hvad der er beskrevet som en kemikaliefordelingscentral. I 1973 blev der ved et tilsyn konstateret oplag af forskellige syrer, vandblandbare opløsningsmidler, TCE, PCE og terpentin. Efterfølgende har ejendommen huset et mindre maskinværksted og senere landbrugsaktiviteter. Ejendommen er beliggende i udkanten af landsbyen Vadsby, og udgør et areal på ca. 65.000 m². Det er dog kun et areal på 3-4.000 m² omkring laden og vejarealet, der har været anvendt til aktiviteterne, så vidt det vides. Ejendommen ligger jf. amtets beskrivelse indenfor indvindingsoplandet til Søderup-Vasby vandværk og den større KE kildeplads Brokilde. Nærmeste recipient er Vasby å, der løber ca. 100 m øst for ejendommen.

I /2/ skønnes det, at det helt overvejende er aktiviteterne fra 73-76, der kan have ledt til forurening, og kortlægningsundersøgelsen planlægges derefter. Der udføres i forbindelse med undersøgelsen 3 filtersatte boringer og en lokaliseringsboring på ejendommen. De filtersatte boringer føres til 13-14 m u.t.. Der PID måles og 2 (to) jordprøver analyseres for kulbrinter, PAH, tungmetaller og pesticider. Fra 3 vandprøver fra de dybe boringer analyseres for kulbrinter, chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter, vandblandbare opløsningsmidler og pesticider. Ved arbejdet konstateres, at geologien til boreddybden primært kan beskrives med et fyldlag af op til et par meters tykkelse, som underlejres af moræneler. Der konstateres vandspejl i varierende dybde i de tre boringer. Der er en nedadrettet gradient i forhold til det primære magasin. I to analyserede jordprøver konstateres et lavt indhold af kulbrinter i den flygtige fraktion, men ellers intet af betydning. I vandprøverne findes totalkulbrinter og BTEX i intervallet 30-300 ug/l, relativt høje indhold af isopropanol og acetone (5.000-10.000 ug/l) og chlorerede opløsningsmidler op til 1.200 ug TCE/l i B2 filtersat 11-13 m u.t. I samme boring findes nedbrydningsproduktet cis-DCE op til 30.000 ug/l. I samme filter træffes lave indhold af flere pesticider, men primært MCPA. De to andre boringer udviser kun relativt lave indhold af chlorerede opløsningsmidler. Det konkluderes, at forureningen udgør en risiko for grundvandsressourcen. Ejendommen kortlægges på baggrund af resultaterne på vidensniveau 2.

På baggrund af dette sætter Københavns amt gang i en supplerende undersøgelse, der udføres af Carl Bro /3/. Carl Bro opstiller i undersøgelsen en konceptuel model (uden at kalde den det), der i et stort omfang skal vise sig at blive styrende for de efterfølgende aktiviteter. I rapporten står der i strategiafsnittet: "Spredningen af de spild, som øjensynligt er sket på jordoverfladen, vil i stor grad være styret af det underliggende lerlags overflade. Det er derfor vigtigt at kortlægge denne for at få fastlagt de steder (lunker), hvor TCE og andre produkter har kunnet samle sig forud for nedsivning gennem moræneleret. Med dette formål for øje blev der planlagt en kortlægning af leroverfladen ved georadar.". Udover georadarundersøgelsen udførtes 25 poreluftmålinger, på forpladsen ud mod vejarealet og langs med laden på begge sider. Der var planlagt flere punkter, men på grund af terrænnært vand og kørsel med maskiner, der ødelagde punkterne blev kun de 25 prøvetaget.

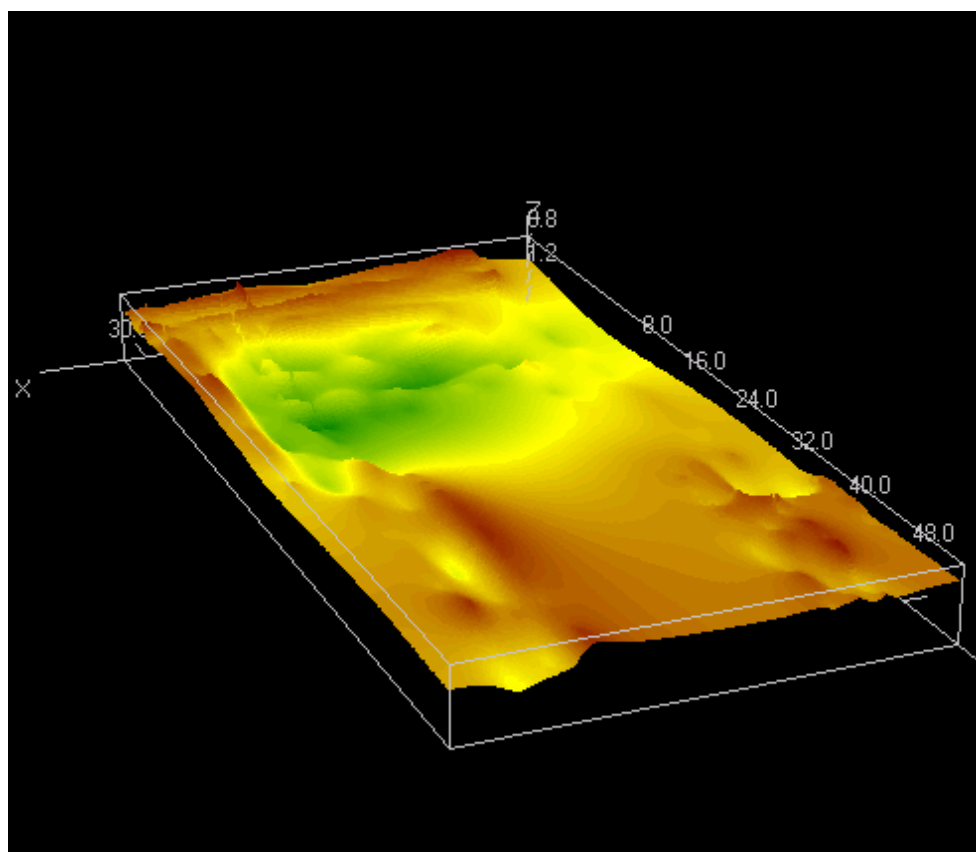
Herudover udførtes der ved undersøgelsen 14 filtersatte boringer, svarende til at tætheden af boringer efter de to undersøgelser var ca. 1 boring pr. 180 m² og tætheden af poreluftpunkter ca. 1 PL pr. 120 m², med hovedvægten af punkter mellem laden og vejen. I forhold til geologien konstateres i 14-15 meters dybde et knap 1 meter tykt vandførende sandlag. Der udføres hydrauliske test der viser, at leren er tættere i dybden end mod terræn. Pejlinger i sandlaget indikerer en strømning mod nordøst. I forhold til forurening konstateres der i PL son-

derne TCE og PCE indhold på mg/m^3 niveau umiddelbart nord og nordvest for laden i PL8/10 (se figur 2). I sonderingerne langs laden findes relativt lave indhold (op til $100\text{--}200\text{ ug}/\text{m}^3$) og i de fleste lavere. Nær de sonderinger hvori der findes lidt højere indhold placeres boringer. Jordprøver udtaget fra boringerne udviser generelt lave til moderate indhold af chlorerede opløsningsmidler, op til ca. $10\text{ mg TCE}/\text{kg}$ i B201 og B204. I vandprøverne træffes generelt moderate indhold af moderprodukterne, i enkelte af boringerne (særligt B2 og B102) høje indhold af nedbrydningsprodukterne cis-DCE og VC. Herudover observeres 1,1,1 TCA. Der er ikke på dette tidspunkt tradition for at analysere for 1,1,1-TCAs nedbrydningsprodukter, så dette undersøges ikke generelt. I en enkelt prøve dokumenteres der et indhold af 1,1-DCA der overstiger indholdet af 1,1,1-TCA. Generelt ses meget divergerende indhold, selv i boringer, der står relativt tæt på hinanden. DTU finder i forlængelse af undersøgelsen Dehalococcoides på ejendommen og store variationer i cloridindholdet. Variationen i chlorid tilskrives den reductive dechlorering.



Figur 2 Bilag fra /3/ der viser boringsplaceringerne for den indledende undersøgelse /2/ og den supplerende undersøgelse /3/. Skala er ca. 1:500.

Georadar undersøgelsen udføres. På figur 3 ses resultatet. Det observeres, at der umiddelbart nord for laden er en depression i morænelersoverfladen. Denne er sammenfaldende med de borer, der har vist de højeste indhold af opløsningsmidler, og samtidig sammenfaldende med hvor der med sikkerhed har været opbevaret og håndteret opløsningsmidler. Den konceptuelle model fasttømmres således på dette tidspunkt.



Figur 3 Morænelersoverfladen opmålt med Georadar i 6x overhøjning. Grønt er lavt (ca. 1,5 m u.t.) og beliggende nord og nordvest for laden, figur fra /3/.

På baggrund af undersøgelserne udarbejder Carl Bro et afværgeprogram for forureningen /4/. Det forurenede indsatsområde dækker ca. 1.000 m² nord og nordvest laden (hot-spot umiddel ved NV hjørne af laden) samt et lille areal med lavere koncentrationer ved ladens sydvestlige hjørne. Indsatsområdet splittes i tre zoner: 1) Den øverste umættede zone med sprækker (4-5 m u.t.), 2) under redoxgrænsen moræneler uden sprækker 5-14 m u.t. og 3) sandlaget under morænen. Carl Bro opgør den samlede masse af opløsningsmidler til knap 50 kg, ud fra de analyser der er udført både i forbindelse med Københavns amts undersøgelser og DTUs analyser. Hovedparten (30 kg) ligger i zone 1 og resten i zone 2. Massen i sandlaget er insignifikant til sammenligning. På baggrund af vurderinger omkring strømningsforhold, nedbrydning og recipient foreslås oprensingskriterier for de klorerede stoffer på 100 ug/l for summen og 20 ug/l for VC. Der vurderes løsninger der indeholder opgravning/opboring, SRD ved injektion da mulighederne for dette umiddelbart vurderes positive efter udførsel af /5/ samt oppumpning og hydraulisk kontrol. Det anbefales, at der arbejdes videre sammen med DTU om injektionsløsninger forud for en beslutning om endelig strategi for oprensning.

Amterne bliver sammenlagt til regioner og i den nye enhed vurderer man, at der er en del uafklarede punkter vedr. forureningen der med fordel kan undersøges, så en eventuel afværgе kan designes endnu mere målrettet. Orbicon udfører derfor endnu en supplerende undersøgelse i 2007 /6/. Undersøgelsens formål er særligt centreret omkring vurderinger af fluxen i sandlaget, en mere præcis masseopgørelse og en nærmere vurdering af potentialet for SRD. På baggrund af /6/ udarbejdes et revideret skitseprojekt /7/. Der udføres 3 yderligere borer til sandmagasinet, så der kan etableres en pejletrekant, samt 1 boring nedstrøms til kalken til belysning af sammenhængen mellem det sekundære sandmagasin og det primære magasin i kalken. Herudover laves 13 stk. MIP sonderinger og 6 stk. kerneprøvetagning. Tidligere filtre prøvetages på ny og redoxparametre samt isotopfraktionering tages i brug til vurdering af nedbrydningen. Herudover laves forskellige hydrauliske test.

På baggrund af både borer og udgravninger foretaget i forbindelse med DTU aktiviteterne fås en dybere forståelse for geologien. Der observeres således opsprækning i den øverste del af moræneleren ned til ca. 6 m u.t., ligesom det konstateres, at sandlaget har større mægtighed mod nord end længere mod syd på ejendommen. MIP profileringerne indikerer også tynde sandindslag i moræneleren i forskellig dybde. Grundvandshastigheden i sandlaget beregnes til nogle få meter om året med en nord-nordvestlig retning. Det konkluderes, at sandmagasinet og kalken står i direkte hydraulisk kontakt.

MIP sonderingerne der udføres placeres stort set udelukkende på den nordlige del af ejendommen, hvor der jf. den tidligere opstillede konceptuelle model er kilder. Ved sonderingerne måles dels elektrisk ledningsevne som et udtryk for geologien, dels et signal fra FID/DELCD/PID detektorer på en bæregas, der cirkuleres forbi en opvarmet membran i bunden af sonden. Sonderingerne udviser "meget forskellige udslag i sonderinger placeret tæt på hinanden". To sonderinger placeret ½ meter fra hinanden viser således kraftigt udslag i samme dybde i den ene og intet udslag i den anden. Dette tolkes som store geologiske inhomogeniteter på lokaliteten. Ud fra de samlede data vurderes det, at der er tale om to hotspots som vist på figur 4. Data tætheden af MIP sonderingerne er på dette tidspunkt i størrelsen 1 MIP sondering/80 m², hertil kommer så borerne. Der udtages 14 jordprøver fra kerner til korrelation med MIP sonderingerne. Der findes både relativt høje TCE, PCE og 1,1-DCA koncentrationer i nogle af prøverne, indhold findes op til knap 100 mg/kg. Det vurderes, at der er mindre mængder residual fri fase tilstede i de to områder. I den fornyede vandprøvetagning konstateres meget høje VC koncentrationer i B2, tæt på 100 mg/l. Både på baggrund af de direkte kemiske målinger, detektion af specifikke nedbrydningsbakterier og isotopfraktionering konkluderes, at der foregår en stor naturlig nedbrydning på stedet, særligt ved det vestlige hot-spot, hvor der er elektrondonorer tilstede i form af polære opløsningsmidler.

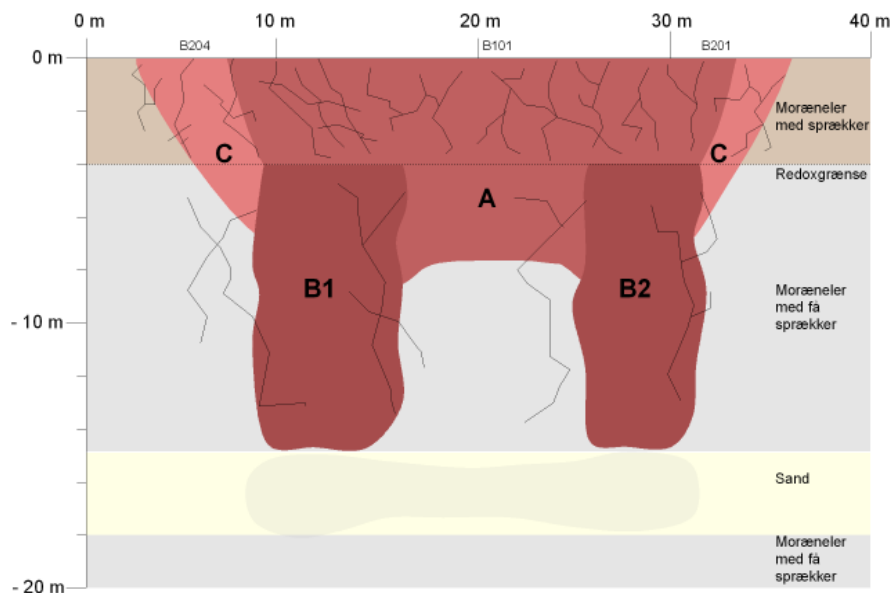
Et nyt masseestimat udføres og det beregnes, at der er 150-200 kg i de to hotspots, hvor der i det vestlige hot-spot dels er den største masse og dels det største relative indhold af ethaner. Det beregnes, at fluxen igennem sandmagasinet er ca. 10-20 g/år.

Den opstillede konceptuelle model udbygges i forhold til tidligere med en mere detaljeret tilgang til spredningsmønsteret i ler og en meget mere detaljeret tilgang til nedbrydningen. I forhold til risikovurderingen vurderes det, at den nuværende flux vil kunne give anledning til koncentrationer lige omkring grænseværdien i Soderup-Vasby indvindingen, men at fluxen kan stige i fremtiden, baseret på bl.a. de meget høje koncentrationer af VC fundet i porevandet over sandlaget. Orbicon udarbejder et revideret afværgeprogram og skitseprojekt på baggrund af den nye viden i /7, 8/. En revideret konceptuel model præsenteres på baggrund

af /6/. Denne er vist i figur 5. Efter skitseprojekteringen anbefales det at bruge ISTD i områderne B1 og B2 på figuren og SRD på område A. Kombinationen søger bl.a. at udnytte en meget aggressiv teknik til områderne med fri fase og samtidig udnytte noget af spildvarmen i forhold til SRD delen.



Figur 4 Screenshot fra en 3D model opbygget ud fra MIP sonderingerne. De grønne volumener indikerer de værst forurenede områder, fra /6/.



Figur 5 Konceptuel model for forureningsudbredelsen på Vasbyvej 16A set i et vest-øst gående snit gennem de to hotspots. De øverste 4 meter består af opsprækket moræneler, som efterfølges af moræneler med færre sprækker og sandslirer, som igen efterfølges af det sekundære sandmagasin, fra /7/.

I forbindelse med skitseprojektering laves der både en revideret masseopgørelse og risikovurdering. Samlet set skønnes det ud fra en antagelse om tilstedeværelse af fri fase i hot-spot B1 og B2, at den samlede forureningsmængde på grunden er op mod 950 kg hvoraf mere end halvdelen er i B1 alene.

I slutningen af 2010 og begyndelsen af 2011 udføres der en termisk oprensning af felterne B1 og B2 på baggrund af /9/. Anlægget drives i en ca. 4 måneders periode og særligt i område B1 ser metoden ud til at have været en succes ud fra både jordprøver og koncentration i den opsugede gas. I område B2 udviser nogle af borerne i randen efter opvarmningen stadig så høje gaskoncentrationer, at det indikerer tilstedeværelse af fri fase i jorden tæt på borerne. Der fjernes ca. 200 kg opløsningsmidler ved opvarmningen. Orbicon diskuterer med Krüger og regionen omkring årsager og vurderer, at der er to sandsynlige kilder til observationerne. Dels kan der være områder under det opvarmede volumen, og dels kan der være "nabo" jord til det opvarmede der afgiver stof.

Regionen igangsætter en yderligere undersøgelse umiddelbart efter ISTD oprensningen med MIP og kerneprøveudtagning efter TRIAD princippet. Fokus er på det NØ hjørne af ejendommen. Nettet i forhold til de tidligere undersøgelser forfines og der udføres ligeledes nogle sonderinger meget tæt på tidligere udførte MIP. Der bliver konstateret nogle arealmæssigt relativt små hot-spot, i størrelsen 10-20 m². Dybden af forureningen strækker sig til gengæld ned til 15 m u.t. i de værste punkter. På baggrund af dette formuleres en revideret konceptuel model, der i princippet bygger på, at hvert eneste sted der har stået én tønde kan der i princippet være et lille horisontalt afgrænset hot-spot, der går til stor dybde. Samtidig forkastes ideen om, at morænenes hældning har styret udbredelsen. Dette leder igen til, at det historiske materiale i sagen gennemgås og en revideret historik udarbejdes /10/. I forbindelse med dette genfindes en række fotos fra ejendommen. På figur 6 er gengivet to fotos fra ejendommen taget i 1973 på forskellige tidspunkter.



Figur 6 Fotos taget fra vejen ind mod laden og langs laden mod sydvest. Fra /10/.

Som det fremgår af figur 6 er der i princippet potentiel mulighed for, at der har ligget tromler og dunke over stort set hele ejendommen. Hallen har tilsyneladende primært været brugt til opbevaring af tørre varer i sække, dvs. kemikalier der ikke umiddelbart har kunnet tåle regn.

På baggrund af historikken og den reviderede konceptuelle model beslutter Region Hovedstaden at udføre endnu en undersøgelse, med henblik på en vurdering af om der er efterladte hot-spots af betydning. Der afvikles i løbet af en kort periode ca. 700 meter MIP sondering, der suppleres med kerneprøvetagning. Tætheden er i visse områder 1 sondering pr. 3-4 m².

Udover de allerede konstaterede hot-spots nord for B2 findes yderligere to områder med høje koncentrationer af opløsningsmidler. Det ene, der ligger langs med det vestlige skel for aktiviteterne var helt ukendt, det andet ligger umiddelbart SØ for det lille opvarmede område. Det estimeredes, at der ligger ca. 175 kg opløsningsmidler i de tre nyligt erkendte områder, indenfor nogle relativt begrænsede arealer /11/. I slutningen af 2011 bliver der udført et graveprojekt med gravekasser, hvor de tre hot-spots er fjernet.

Vi er hermed fremme ved dags dato.

DISKUSSION OG PERPEKTIVERING

Der er en række ting der springer i øjnene, når sagen vurderes i bagklogskabens lys. I det følgende er nogle af de ting jeg har observeret/undret mig over trukket frem.

- Den indledende historik der udføres er rimeligt fyldestgørende, således omtales både de udendørs oplag, belægninger (og fravær af disse), dræningsforhold, kemikalietyper og i et vist omfang håndterede mængder. Billeder af tromler forefindes i dårlige kopier i historikken. Der var således et godt afsæt for undersøgelserne, sammenlignet med det generelle billede fra mange historikker.
- Historikken viste, at der sammenholdt med mange andre ejendomme har kunnet være potentielle spild over et stort areal, der samtidig var ubefæstet. Grundejeren kan nok heller ikke på nogen måde betragtes som gennemsnitlig, idet virksomheden fra starten blev drevet på ulovlige vilkår. Rydningen af ejendommen kom på baggrund af et påbud, hvor kemikalieinspektionen var inde over både denne ejendom og andre som grundejeren havde lignende aktiviteter på. Hvordan den er foregået er ukendt.
- Omfanget af kortlægningsundersøgelsen er ganske spinkelt, når man ser på hvordan spildene er sket. Hvis den ene boring, hvori der blev konstateret betydende forurening, havde været anderledes placeret var ejendommen måske ikke undersøgt videre eller i hvertifælde udskudt til et senere tidspunkt.
- Den første videregående undersøgelse bruger poreluft til at vurdere kildernes placering. Da spildene er relativt gamle og arealet i store træk ubefæstet er langt hovedparten af massen i den øverste umættede del af jorden fordampet/udvasket. Dette betyder, at vi (alle parter) på dette tidspunkt "overser", at selv begrænsede indhold i poreluften kan indikere tilstedeværelsen af en kilde. De kontrolboringer der udføres ved de "mistænkelige" indhold i poreluften rammer heller ikke helt plet (arealerne der skal rammes er små), så kilder overses. Samtidig præsenteres en overbevisende konceptuel model i forhold til spredning og nedsivning, der i store træk passer med det forureningsbillede, der er erkendt. Dette betyder, at hovedparten af de efterfølgende aktiviteter i form af prøvetagning og oprensning fuldstændig tilrettelægges, så de understøtter det der allerede er udført og kun i meget begrænset omfang udfordrer modellen.
- Der skal endog meget høje boringstætheder til før kilderne sidst i forløbet blev afgrænset. Flere af de helt lokale hot-spot der findes er 10-20 m², svarende til en diameter på 3-5 m. Da de høje koncentrationer ligger fra 3-4 m u.t. og ned til 13-15 m u.t. ligger der typisk 20-40 kg opløsningsmiddel ved en sådan "tandrod" som vist på figur 5. Risikoen for at overse dem er derfor høj.
- Massen af opløsningsmidler er svær at gætte/beregne selv ved en høj datatæthed. Gættene strækker sig fra ca. 50 kg til knap 1.000 kg igennem forløbet. Den fjernede masse ved oprensningerne er estimeret til 3-400 kg.
- Den præcise stedfæstelse af aktiviteter (eller manglende ditto) ud fra historikken spiller en helt afgørende rolle for om man finder kilderne.

- Der er i de videregående undersøgelser der foregår efter Carl Bros første undersøgelse en fuldkommen accept af den opstillede konceptuelle model. Modellen bliver i virkeligheden først udfordret ved en tilfældighed pga. afsmitning ind mod det område der oprenses termisk. Hvis kilderne havde været lidt mere separeret kunne der potentielt have været efterladt en masse af samme størrelsesorden, som den der blev oprenset med ISTD.

I forhold til fremtidige undersøgelser på ejendomme med kombinationen af moræner og chlorerede opløsningsmidler kan der uddrages nogle konklusioner fra de undersøgelser der er udført på Vadsbyvej:

- En god historik er et vigtigt afsæt for en god undersøgelse. Hvis ejendommen er i en høj risiko gruppe for potentielle spild af chlorerede opløsningsmidler bør der udføres en så dybdegående historik som overhovedet muligt for at få udpeget samtlige punktkilder og områder for de tidligere aktiviteter.
- Poreluftundersøgelser på ubefæstede arealer med ældre forureninger skal fortolkes meget kritisk. Forvent ikke høje koncentrationer tæt på terræn under disse forhold selv tæt på relativt høje jordkoncentrationer i mættet zone.
- MIP sonderinger viste sig at være et rigtig godt værktøj til afgrænsning af hot-spots. Der er forskel på, hvor dygtige de enkelte operatører er til at udføre sonderingerne, ligesom der er betydelige hastighedsforskelle.
- Kerneprøver er et vigtigt supplement til MIP, idet det er svært at estimere en masse af opløsningsmidlerne ud fra de udførte undersøgelser. PID var ligeledes kun indikativ, idet der ikke kunne opnås en tilfredsstillende sammenhæng mellem PID og koncentrationer i jordprøverne.
- Kilder der ikke er stationære som kloakker, støbte kar, nedgravede tanke, etc. kræver en anden strategisk tilgang i forhold til undersøgelser. Her er oplag eller potentielle områder for tilfældig udhældning typiske. Den slags kilder kan normalt kun stedfæstes til større arealer. Til gengæld kan bare et lille område med høje koncentrationer udgøre en potentiel høj risiko for grundvandet. En trinvis tilgang hvor områder frem for punkter tilgås med netværk af eksempelvis poreluft indledningsvist kan afsløre om der overhovedet er potentiale. Hvis der konstateres selv begrænsede indhold ved en sådan screening bør det nøje overvejes, om der skal udføres mere tilbundsående screeninger af underliggende jord/grundvand.
- Vær altid positivt kritisk overfor den konceptuelle model. Overvej altid, om det der er screenet ud af undersøgelsen på baggrund af den konceptuelle model, er tilstrækkeligt belyst ud fra alle de tilgængelige data af både historisk, erfaringsmæssig og måleteknisk karakter.

REFERENCER

- /1/ Birch og Krogboe (2004): Historisk redegørelse, Bækgårdsvej 5/Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /2/ Hedeselskabet (2005): Indledende forureningsundersøgelse, Tidligere kemikaliefordelingscentral, Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /3/ Carl Bro (2006): Vadsbyvej 16A, Taastrup. Omfattende forureningsundersøgelse. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /4/ Carl Bro (2006): Vadsbyvej 16A, Taastrup. Afværgeprogram. Udarbejdet for Københavns Amt.

- /5/ NIRAS (2006): Pneumatisk frakturering. Dokumentation af pilotforsøg. Vadsbyvej 16A, Hedehusene. Udarbejdet for Københavns Amt.
- /6/ Orbicon (2007): Vasbyvej 16A - supplerende undersøgelser. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.
- /7/ Orbicon (2008): Afværgeprogram, Vasbyvej 16 A, Taastrup. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.
- /8/ Orbicon (2008): Skitseprojekt, Vasbyvej 16 A, Taastrup. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.
- /9/ Orbicon (2009): Detailprojekt - ISTD, Vasbyvej 16 A, Taastrup. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.
- /10/ Orbicon (2011): Kemikalieforhandling og håndtering. Historisk redegørelse. Vadsbyvej 16A, 2640 Hedehusene. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.
- /11/ Orbicon (2011): Afgrænsende undersøgelser for dimensionering af graveprojekt, Vadsbyvej 16A. Udarbejdet for Region Hovedstaden, Koncern Miljø.

GEOLOGISK KARAKTERISERING AF MORÆNELER

Seniorforsker Knud Erik Klint, GEUS
Systemudvikler Bjarni Pjetursson, GEUS
Seniorforsker Bertel Nilsson, GEUS
Ph.d.-studerende Timo C. Kessler, GEUS

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUMÉ

I forskningsprojektet REMTEC testes effekten af tre stimuleringsmetoder i forbindelse med in situ oprensning af chlorerede opløsningsmidler i moræner/1/. Sideløbende med stimulering og oprensningsforsøg er der udviklet nye metoder til karakterisering af moræner, herunder implementering af GIS-værktøjer for at kunne vurdere geologisk og hydraulisk heterogenitet i områder dækket af moræner. Resultatet af disse aktiviteter bliver nu publiceret, dels som et koncept, der på regional/mark skala opdeler større områder dækket af moræner i mindre områder med potentielt ensartet geologisk heterogenitet /1/ og dels på siteskala, som et web-baseret simpelt multiple choice værktøj: "SiteEval", der kan bruges til at lave en mere detaljeret geologisk karakterisering af punktkildeforureninger i morænersområder

BAGGRUND

Opsprækkede lavpermeable glaciale sedimenter, især moræner, dækker store dele det nordlige og centrale Europa og udgør et stort problem i relation til spredningen af forurenede stoffer gennem umættet zone og mættet zone til grundvandet, idet forureningen overordnet transporteres gennem naturlige sprækker og makroporer /2/,/3/. Glaciale aflejringer hører til de mest komplekse og heterogene sedimenttyper, man kender, og forsøg på at oprense sådanne områder er forbundet med store udfordringer. En detaljeret geologisk karakterisering er derfor essentiel for at kunne udarbejde optimale oprensningsstrategier. En lang række systematiske undersøgelser af specielt sprækker i moræner er gennemført igennem de sidste 15-20 år (Fig. 1) /4/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/, /10/. Lignende undersøgelser er udført i Canada /11/, /12/,/13/ på Island /14/ og i Polen /15/. Der foreligger således data fra mere end 40 lokaliteter, hvoraf de 25 er placeret i Danmark - primært på Sjælland. Tilsammen udgør de indsamlede data en væsentlig kilde til vurdering den geologiske heterogenitet og til dels den hydrauliske heterogenitet i forskellige geologiske scenarier, der omfatter moræner.

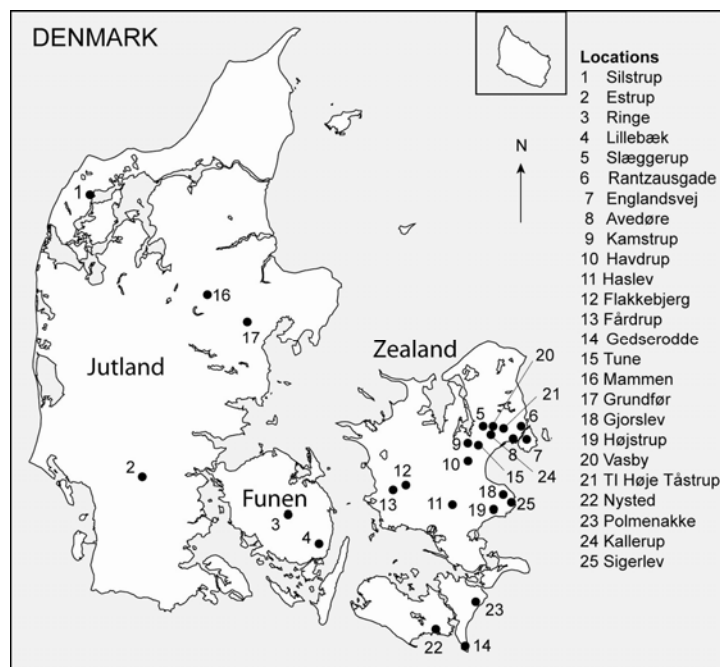


Fig. 1 Oversigt over lokaliteter i Danmark hvor der er lavet systematisk karakterisering af sprækker og moræner.

FORMÅL

Et af målene i REMTEC-projektet var at skabe en bedre forståelse for sprækker og sandliners betydning for spredning af miljøfremmede stoffer i moræneler samt implikationer i forhold til "in situ" oprensningmetoder og udvikling af teknologier til aktiv stimulering af oprensnings-metoderne. Samtidig ønskedes introduktion af geostatistiske metoder til at beskrive geologisk/hydraulisk heterogenitet, således at observationer lettere kan introduceres i modelsimuleringer. På den baggrund er alle eksisterende data fra tidligere undersøgelser og nye opmålinger blevet samlet i en fælles database. For at indplacere de forskellige lokaliteter i en overordnet geologisk ramme er udviklet et nyt koncept, hvor en række konceptuelle geologiske modeller med potentiel ensartet grad af heterogenitet på oplands- og markskala er defineret. Disse modeller repræsenterer de flest mulige kombinationer af morænelers scenarier der optræder i det danske istidslandskab.

Nærværende artikel har derfor tre formål

1. Udvikle en simpel systematiske metoder til at tolke aflejringssmiljø og klassificere moræneler i forskellige glaciale landskabsformer. Metoderne er baseret på tilgængelige GIS data samt ved hjælp af strukturelle, teksturelle, og geotekniske egenskaber observeret og målt i feltundersøgelser.
2. Vurderer typisk geologisk heterogenitet (fordeling af sprækker og sandlinser) i de forskellige morænelerstyper.
3. Opstille foreløbige konceptuelle modeller med forskellige grader af heterogenitet baseret på eksisterende data.

GLACIALE LANDSKABSFORMER OG DERES RELATION TIL SEDIMENTTYPER

Termen moræneler benyttes bredt om lerede dårligt sorterede sedimenter, der er aflejret i et glacialt miljø. For at kunne lave en yderligere opdeling af moræneler, relateret til specifikke glaciale aflejningsprocesser, er det nødvendigt at lave opdele moræneler i undertyper med karakteristiske grader af geologisk heterogenitet. I denne forbindelse anvendes den internationalt anerkendte term *Till*, der benyttes om sedimenter afsat direkte fra en gletsjer (iskontaktsediment), enten sub-glacialt under gletsjeren som *basal till*, der kan opdeles i A-type, der er deformeret blødt "ductile", og B-type, der er deformeret sprødt "Brittle". Derudover optræder glacioteconites "*subglacial melt-out-till*" eller oven på isen (supra-glacialt) ved udsmeltnings og nedglidning fra selve isen som *flow-till* (flydemoræne). Endelig optræder moræneler som droptill, der er et issøsediment med dropsten fra smeltende isbejrge. Disse sedimenttyper udgør de primære byggesten i glaciale landskaber Figur 2.

Klassifikation af till typer omfatter bjergartsbeskrivelse og kinetostratigrafiske undersøgelser /16/, der indbefatter beskrivelse af bjergarternes kornstørrelsesvariation, tekstur, sedimentære strukturer, farve, kalkindhold samt måling og beskrivelse af deformationer, skurestriber, klast fabrik m.m. Kombineret med geotekniske undersøgelser og geomorfologisk analyse kan aflejringssmiljøet tolkes, og den geologiske/geotekniske historie rekonstrueres.

Det er som tidligere nævnt vigtigt for tolkningen af naturlige sprækkers og sandliners oprindelse at belyse, om det undersøgte moræneler er afsat på, foran eller under en gletscher,

samt i hvilken retning gletscheren bevægede sig. Sammenhængen imellem till typer og geomorfologi er essentiel, idet specielt sub-glaciale (belastede) landskabstyper har vist sig ofte at indeholde relativt systematisk opsprækket basale tills. Randglaciale landskabstyper er ofte tektonisk forstyrrede og dermed stærkt heterogene, hvorimod supra-glaciale landskabsformer som f.eks. dødislandskaber ofte er domineret af svagt konsoliderede flow tills, der overlejrer underliggende landskabselementer som hedesletter, moræneflader eller randmoræner. I øjeblikket er det digitale geomorfologiske kort over Danmark under udarbejdelse på GEUS. Ved hjælp af dette kort kan landskabet inddeles i områder præget af subglacial, supra-glaciale rand-glacial eller proglaciale processer. De sub-glaciale deformationsmekanismer påvirker kun sedimenter under selve gletscheren, og relaterede sprækker er derfor kun til stede i sedimenter af samme eller ældre alder end isfremstødet. Sprækker, der overpræger eller genanvender ældre sprækker i f.eks. en lodgement till, kan derfor antages at være yngre og af "ikke glacial oprindelse" d.v.s. fryse/tø, udtørring eller neo-tektonisk oprindelse. Dette understreger betydningen af at kende et sediments alder og dannelseshistorie, når man skal klassificere moræner. Det har også vist sig, at ikke kun den geomorfologiske ramme, men også de underliggende lag synes at have indflydelse på de geotekniske forhold og dermed fordelingen af naturlige sprækker i moræner.

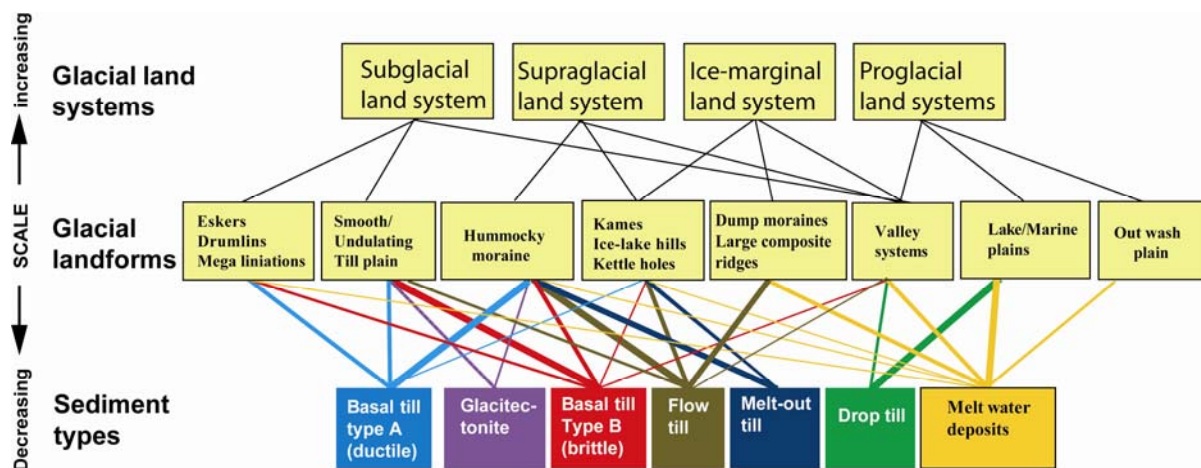


Fig. 2 Relation imellem landskabssystemer, landskabsformer og sedimenttyper. Som det fremgår, udgør sedimenttyperne de basale "byggeklodser" i landskabsformerne, der tilsammen udgør overordnede landsystemer opdelt efter placeringen i forhold til aflejningsmiljø under, på eller foran en gletsjer.

I et forsøg på at kombinere og sammenligne nogle af ovenstående parametre er der blevet udarbejdet en ny type tematisk kort med det formål at vurdere graden af opsprækning/geologisk heterogenitet i områder dækket af ler. Kortet benævnes *Det Polymorfologiske Kort* og tager udgangspunkt i det geomorfologiske kort, men en tolkning af underliggende landskabsformer er indarbejdet i kortet, der dermed kan sammenlignes med bl.a. ler tykkelse og dybde til redox grænse for at udpege områder med potentielt ensartet grad af heterogenitet og opsprækning. Det antages, at de forskellige polymorfologiske typer også har karakteristiske hydrauliske egenskaber, som i praksis dikteres af de underliggende sediments skønnede dræningsevner. Dette koncept er præsenteret tidligere i ATV regi og egner sig primært til at opdele landskabet i områder med potentielt ensartet grad af heterogenitet i en

mere regional skala. Det åbner imidlertid op for muligheden at benytte samme koncept på punktkildeskala i forbindelse med karakterisering af forurenede grunde.

"SiteEval" ET WEB-BASERET TOLKNINGSVÆRKTØJ

Et simpelt webbaseret till klassifikationssystem for moræner er således konstrueret og under fortsat udarbejdelse. Det fungerer som et "multiple choice" værktøj, hvor forskellige geologiske egenskaber kan vælges, og hvor output bliver en eller flere till-enheder, der kan kombineres med smeltevandsaflejringer i en konceptuel geologisk model (PM model), der derefter kan benyttes til at vurdere områdets overordnede opbygning og grad af geologisk heterogenitet ud fra viden om og sammenligning med tilsvarende modeller undersøgt andetsteds.

Værktøjet er som sagt web-baseret og koblet op på de national geologiske databaser på GEUS, og som udgangspunkt kan man lave en hurtig screening af eksisterende data fra undersøgelsesområdet.

Dernæst kan man ved hjælp af indledende undersøgelser foretage en mere detaljeret tolkning af sine boredata og evt. oplysninger fra udgravninger og derigennem definere/tolke de enkelte geologiske enheder og deres dannelseshistorie.

Øvelsen er delt op i 3 indledende trin og 3 videregående trin:

Step 1: *Till Klassification af de enkelte enheder.* (baseret på GIS-data, feltopmålinger, boredata.

Input data er: Klast fabrik/skurestriber, deformationsstrukturer, tekstur, konsolidering, geomorfologisk ramme.

Out-put : *till type/konceptuel model vers.1* figur 3.

Step 2a: *Vurdering af sprækkefordeling i hver enkelt enhed.* (baseret på boredata/opmåling af udgravning)

Input data er: Till type (fra step 1), till/ler tykkelse, dybde til redoxgrænse, sediment/bjergartstype i første lag under till, Dybde til grundvandsspejl (primært og sekundært). Referer til "best fit PM-geologisk model se figur 4.

Output: *Potentiel sprækkefordeling i enkelt till enhed*

Step 2b: *Vurdering af sandlinsefordeling i hver enkelt enhed* (baseret på boredata)

Input data er: till type fra step1, sandlinsefrekvens. kumulativ tykkelse af sandlinser.

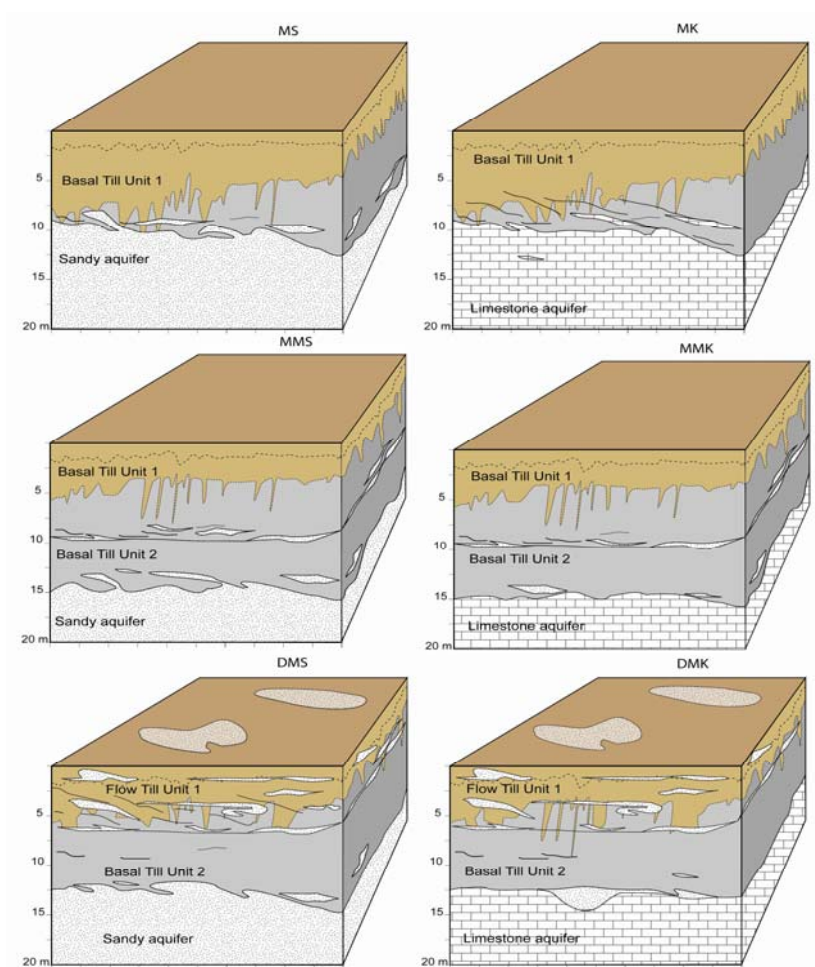
Output samlet for 2a og 2b: *Konceptuel geologisk model vers. 2.*

Step 3: Foreløbig geologisk/hydraulisk karakterisering baseret på sprække fordeling og sandlinsefordeling i andre tilsvarende scenarier.

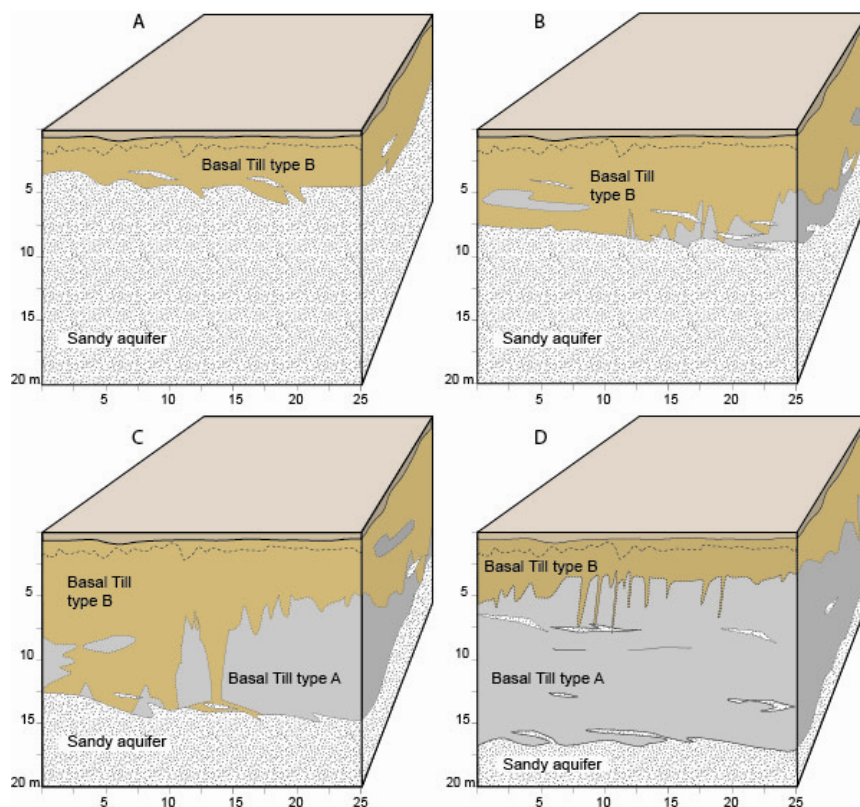
Step 4: Kalibrering af model baseret på hydrauliske test og evt. fund af forurening m.m.

Step 5: Evaluering af data, definering af yderligere vidensbehov, anbefalinger til yderligere undersøgelser (flere borer, evt. udgravning, hydrauliske test m.m.), herefter implementering af nye data og gentagelse af step 1-4 indtil tilfredsstillende model er opnået.

Step 6 Formulering af stimulering og oprensnings strategi.



Figur 3 Konceptuelle geologiske modeller version 1 repræsenterende forskellige overordnede PM-konfigurationer.



Figur 4 Konceptuel model version 2. Tykkelsesvariationens betydning for udvikling af sprækker i M(M)S konfigurationen

A: 0-5 m moræneler. B: 5-10 m moræneler. C: 10-15 m moræneler. D: >15 m moræneler.

KONKLUSION

Der er mange udfordringer i forbindelse med karakterisering af moræneler. Generelt må det konkluderes, at især tykkelsen og de geotekniske egenskaber synes at være afgørende for fordelingen af sprækker og sandlinser i moræneler. Ligeledes har forskellige typer moræneler forskellige grader af heterogenitet. En klassifikation af moræneleren er således et basalt skridt imod vurdering af potentiel opsprækning og geologisk variabilitet, og samtidig en god indikator for vurdering af yderligere vidensbehov.

En simpel metode til opdeling af glaciale landskaber i mindre områder med potentiel ensartet geologisk variabilitet er udviklet, og kombineret med webbaserede klassifikationsmetoder for moræneler vil metoden kunne udgøre et vigtigt skridt i retning mod en ny forbedret systematisk metode til geologisk karakterisering af punktkildeforureninger såvel som fladekilde forureninger i områder dækket af moræneler.

REFERENCER

- /1/ Christiansen, C.M., Damgaard, I., Broholm, M.M., Kessler, T., Klint, K.E., Nilsson, B. & Bjerg, P.L. 2010: Comparison of Delivery Methods for Enhanced In Situ Remediation in Clay Till. *Ground Water Monitoring & Remediation*, vol. 30 pp 107-122.
- /2/ Fredericia J (1990) Saturated hydraulic conductivity of clayey tills and the role of fractures. *Nord Hydrol* 25:119–132
- /3/ Ruland WW, Cherry JA, Feenstra S (1991) The depth of fractures and active groundwater flow in a clayey till plain in southwestern Ontario. *Ground Water* 29(3):405–417
- /4/ Klint, KES., Abildtrup, C.A., Gravesen, P., Jakobsen, P.R., and Vosgerau, H. 2001: Sprækkers oprindelse og udbredelse i moræner i Danmark. *Vand og Jord* 8, 3, 111-119.
- /5/ Klint K.E.S., 2001 Fractures in Glacigene Diamict deposits; Origin and Distribution. Ph.D-thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland, Special report no. 129.
- /6/ Klint KE, Gravesen P (1999) Fractures and biopores in Weichselian clayey till aquitards at Flakkebjerg, Denmark. *Nord Hydrol* 30 (4/5):267–284
- /7/ Jakobsen PR, Klint KES (1999) Fracture distribution and occurrence of DNAPL in a clayey lodgement till. *Nord Hydrol* 30(4/5):285–300
- /8/ Jørgensen PR, McKay L, Kistrup J (2004). Aquifer vulnerability to pesticide migration through till aquitards. *Ground water*, 42(6-7), 841-855.
- /9/ McKay LD, Fredericia J, Lenczewski M, Morthorst J, Klint, KES (1999) Spatial variability of contaminant transport in a fractured till, Avedøre, Denmark. *Nord Hydrol* 30(4/5):333–360
- /10/ Nilsson B, Sidle RC, Klint KES, Bøggild CE, Broholm K (2001) Mass transport and scale dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till-sandy aquifer system. *J Hydrol* 243:162–179
- /11/ D'Astous AY, Ruland WW, Bruce, JGR, Cherry JA, Gillham RW (1989) Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. *Can Geotech J* 26:43–56
- /14/ Klint K.E.S., Richardt N. and Krüger J. 2010: Evidence for subglacial deformation and deposition during a complete advance-stagnation cycle of Kötluþjökull, Iceland – a case study. In *The Myrdalsjökull Ice Cap, Iceland, 13, Glacial Processes, Sediments and Landforms on an Active Volcano*. Ed. Schomacker A, Johannes Krüger J, Kjaer K. pp 145-159.
- /15/ Tzovolou D.N., Benoit Y., Haeseler F., Klint K.E.S and Tsakiroglou C.D. 2009: Spatial distribution of jet fuel in the vadoze zone of a heterogeneous and fractured soil. [Science of The Total Environment Vol. 407, 8](#). 1. Pp 3044-3054.
- /16/ Berthelsen, A., 1978. The methodology of kineto-stratigraphy as applied to glacial geology. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 27, Special Issue, 25–38.

AKNOWLEDGEMENT

Dette Projekt er en del af REMTEC-projektet koordineret af DTU og finansieret af DSF

HYDROGEOLOGY IN CLAY TILLS

Phd student Timo Kessler 1,2
Senior researcher Knud Erik Klint 2
Senior researcher Bertel Nilsson 2
Professor Poul L. Bjerg 1

1 Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, DTU Miljø
2 Geological Survey of Denmark and Greenland, GEUS

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUME

Low-permeability soils such as clayey tills constitute geological boundaries to underlying chalk aquifers that are commonly used as a drinking water resource. Fractures and sand lenses within till sequences represent hydraulic avenues with high hydraulic conductivities limiting the protective function of such layers. They potentially facilitate vertical migration and horizontal spreading of pesticides, chlorinated solvents and other pollutants into deeper aquifers. This paper presents methods how to analyse and describe the spatial distribution of sand lenses in tills and what impact they may have on the hydraulic regime within a clayey till aquitard.

De fleste steder i Danmark danner moræneler en geologisk grænse til underliggende grundvandsmagasiner, der udgør vigtige drikkevandskilder i den danske vandforsyning. Sprækker og sandlinser i moræneleret resulterer i en øget strømning gennem disse og således mindskes den beskyttende effekt af de lavresistive morænelerslag. Den geologiske heterogenitet fremmer vertikal og horisontal transport og dermed en spredning af pesticider, klorerede opløsningsmidler og andre forurenende stoffer både horisontalt i de øvre jordlag og til dybere grundvandsmagasiner. Artiklen præsenterer metoder til at beskrive den rumlige fordeling af sandlinser i moræneler, og hvilken effekt de har på vandets strømning gennem undergrunden.

INTRODUCTION

In large parts of Denmark the sedimentary horizons of the surface geology consist of glacial deposits from the Weichselian glaciation (Houmark-Nielsen, 2004). These low-permeability sediments are often referred to as glacial diamicts or clayey tills. As a result subsurface flow and transport is controlled by preferential flow in fractures and sand lenses (Sidle et al., 1998; Nilsson et al., 2001). Fractures occur mainly in the upper till horizon 3-5 meters below ground surface. In places the vertical openings create fracture networks and enable rapid downward migration of water and contaminants (Broholm et al., 2000; Jørgensen et al., 2002). Below, horizontally oriented sand lenses create hydraulic avenues and alter the subsurface conductivity field. With regard to contaminant transport sand lenses are important to consider as they facilitate horizontal spreading.

Sand lenses in tills appear in complex shapes and diverse geometry. A way to systematically characterize and classify sand lenses was introduced in (Kessler et al., 2012). It was concluded that smaller features such as sheets, bodies and pockets may play a role for the hydraulic regime, not individually, but as a connected channel network. Thus, it is required to analyse the spatial variability of sand lenses within a certain till horizon. Stochastic methods give us a toolbox to analyse and model the distribution of sand lenses and to assess the connectivity between them (Fogg and Noyes, 1998; Hu, 2008). They create a network if the entity of conductive facies can transfer a fluid through an aquitard without being limited through diffusive processes in the surrounding matrix.

The inclusion of hydraulically active zones adds crucial detail to both, geological and hydraulic models when trying to account for geological heterogeneity. With regard to contaminated sites in such settings the conceptualization of geological heterogeneity is a pre-requisite for reliable transport modeling and successful implementation of mass-removal remediation technologies. This paper presents results from mapping and modeling of sand lense variability in tills.

MATERIALS AND METHODS

Sand lenses were mapped in the Kallerup gravel pit in the Eastern part of Denmark. Till sections were exposed at the edges of the excavation displaying sand facies and other glaciotectonic deformation features in full detail. The sections were cleared and photographic mapping techniques were employed to capture the spatial pattern and geometry of sand lenses. The true images were subsequently converted into digital conceptualizations of the facies distribution. The procedure is illustrated in Figure 1. Those pictures are also called training images as they represent the true distribution of geological facies and can be used as conditional data in stochastic simulation.

Having such training images on hand, variogram modeling was performed to determine statistical parameters, such as correlation lengths and variances. For these calculations the geostatistical modeling software SGeMS was used. Besides the variogram modeling of the mapped sections, SGeMS also provides several simulation algorithms to estimate sand lense distributions at unknown locations. There is a number of approaches of which the most useful are sequential indicator simulation (Deutsch, 2006) and multiple-point simulation (Strebelle, 2005). These algorithms are appropriate as they can simulate categorical variables. In the case of clay till it is often sufficient to classify geological facies into only two categories, namely sand lenses and clayey matrix.

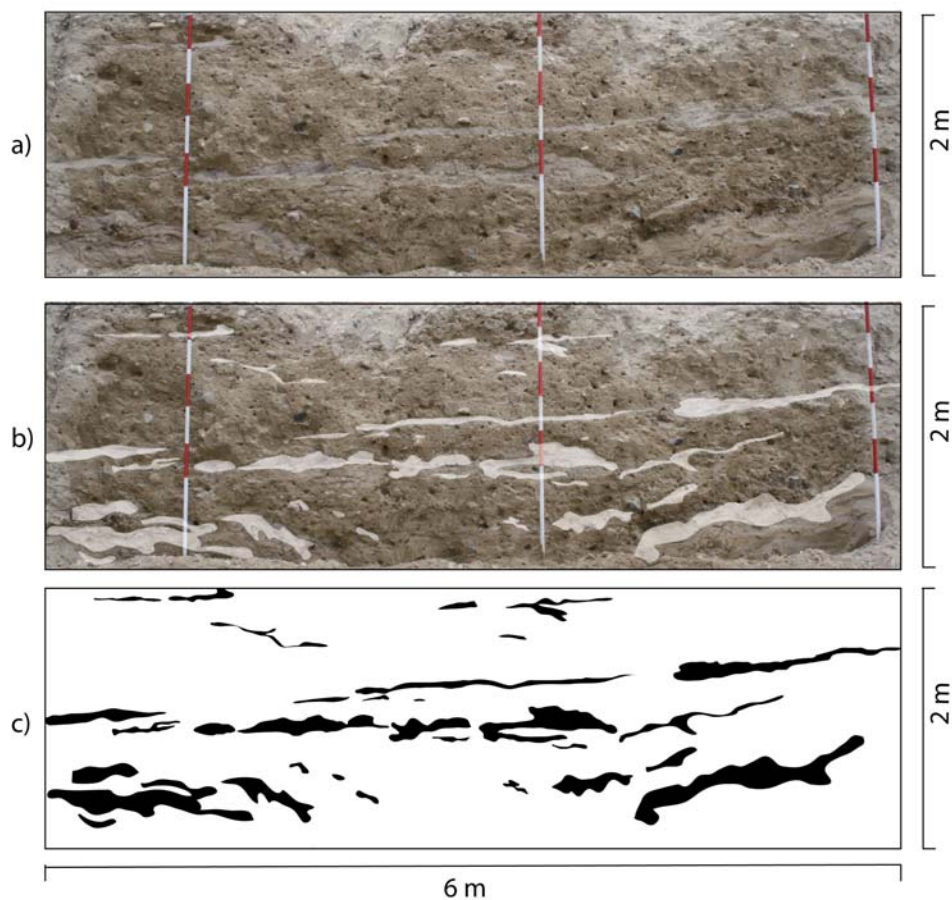


Figure 1: Mapping procedure starting from a natural outcrop (a) to a digitalized and categorized training image (c).

RESULTS AND DISCUSSION

The sand deposits appear at variable geometry, size and shape and require careful interpretation. The irregularity is caused by erratic glacial depositional processes and tectonic deformation (Evans et al., 2006). The mapping was done for two-dimensional cross-sections in NW-SE direction. Here, proportions of 9-10 % sand relative to clay matrix were measured. In other studies, mean proportions of up to 50% sand facies were required to achieve connected flow paths. However, these estimates are for the isotrop case. The mapped deposits show strong vertical anisotropy meaning that the thickness is significantly smaller compared with the horizontal extent. This results in planar or elongated shapes of most of the lenses. Further seems the distribution to be instationary. In the upper part of the section are less lenses visible than in the lower horizon. Instationarities are particularly challenging to reproduce in stochastic modeling.

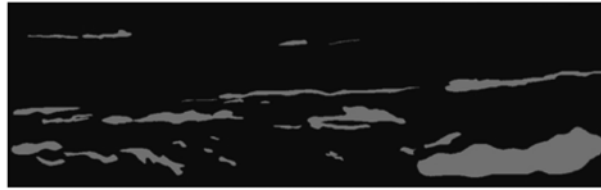
This pattern is evidenced by a varying vertical frequency between the sand lenses from 40 cm at the top and partly less than 10 cm in the lower part. The variogram calculates a range in horizontal direction of ~80 cm which corresponds to the correlation lengths. In vertical direction this parameter is smaller accordingly at approximately 15 cm. Variances are small as the variogram is calculated from a fully resolved training image.

Geostatistical simulations were run using the datasets from the mapped sections as conditioning data. The datasets had to be thinned to about 10% of the initial size to allow estimation. A sample training image and one realisation of the sequential indicator simulation (SIS) and the multiple-point simulation (MPS) is presented in Figure 2.

In both cases, the proportions as well as the elongated shapes could be reproduced. Limitations in both cases are the strong instationarity and the high variability of lengths of the lenses. It seems as if both algorithms overvalue the mean lengths of lenses. In the case of SIS this problem is due to the variogram parameters, whereas for the MPS the search template on the training image is likely not perfectly defined. Similarly, the varying size of the deposits was difficult to model. In particular, the large sand features are missing in the stochastic realizations.

When comparing the two methods, it seems as if the MPS simulation shows slight advantages in terms of the shape of lenses. The anisotropy is better reproduced and the shapes are smoother than in the SIS simulation. A second problem related to SIS is the occurrences of noise in the realizations. There are a number of undersized sand pockets that do not exist in the nature, but cannot be avoided easily in the model. Therefore, post-processing of the results became necessary (not visible in Figure 2).

Mapped training image



Sequential indicator simulation



Multiple-point simulation



Figure 2: Mapped cross-section indicating the clayey matrix (black) and the sand lenses (grey). The lower two pictures show simulation results with a sequential indicator (SIS) and a multiple-point (MPS) algorithm.

These simulations provide possible realizations of the subsurface heterogeneity field. These are naturally uncertain to a certain degree, however, they can be implemented in hydraulic models and refine an otherwise averaged conductivity field. Another challenge is how to assign valid K-values to the sand lenses, as they differ in grain size and thus in hydraulic permeability.

In many engineering applications open cross-sections are rarely available at the site of interest. The simulations in Figure 2 are based on a training image from a gravel pit where there is no contamination to bother about. In order to perform such modeling to contaminated sites, the user needs to use training data from analogue sites. The simulation can then be conditioned with hard data from well descriptions within the area of interest. With this in mind, mapping geological sections can help to simulate the subsurface where geological hard data is rare.

CONCLUSION

The detailed mapping of sand lenses within a clayey till was found very useful to understand the spatial variability and the complex geometries and structures of sand lenses in tills. It supported the performance and the evaluation of simulations with regard to their representativeness. This is particularly important to find an appropriate alignment of the model parameters. The integration of a heterogeneity model further enhanced the quality of ordinary geological models. Preliminary results presented in this paper suggest multiple-point statistics to be the slightly better method to model complicated heterogeneity such as sand lenses in clay till. The method pictured nicely the irregular distribution of the lenses and performed well on modeling the elongated shapes. The applicability of these methods will be further evaluated in subsequent hydraulic modeling.

REFERENCES

1. Broholm, K., Nilsson, B., Sidle, R.C., Arvin, E., 2000. Transport and biodegradation of creosote compounds in clayey till, a field experiment. *J.of Cont.Hydr.* 41, 239-260.
2. Deutsch, C.V., 2006. A sequential indicator simulation program for categorical variables with point and block data: BlockSIS. *Computers & Geosciences* 32, 1669-1681.
3. Evans, D.J.A., Phillips, E.R., Hiemstra, J.F., Auton, C., 2006. Subglacial till: Formation, sedimentary characteristics and classification. *Earth-Sci.Rev.* 78, 115-176.
4. Fogg, G.E., Noyes, C.D., 1998. Geologically based model of heterogeneous hydraulic conductivity in an alluvial setting. *Hydrogeology Journal* 6, 131-143.
5. Houmark-Nielsen, M., 2004. The Pleistocene of Denmark: A review of stratigraphy and glaciation history. *Developments in Quaternary Sciences* 2, 35-46.
6. Hu, L.Y., 2008. Multiple-point geostatistics for modeling subsurface heterogeneity: A comprehensive review. *Water Resour.Res.* 44 %6, W11413.
7. Jørgensen, P.R., Hoffmann, M., Kistrup, J.P., Bryde, C., Bossi, R., Villholt, K.G., 2002. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis. *Water Resour.Res.* 38, 1246.
8. Kessler, T., Klint, K.E.S., Nilsson, B., Bjerg, P., 2012. Characterization of sand lenses in low-permeability clayey tills. *Quaternary Sci.Rev.* (submitted).
9. Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E., Boggild, C.E., Broholm, K., 2001. Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system. *Journal of Hydrology* 243, 162-179.
10. Sidle, R.C., Nilsson, B., Hansen, M., Fredericia, J., 1998. Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. *Water Resour.Res.* 34, 2515-2527.
11. Strebelle, S.&.R.N., 2005. *Post-processing of Multiple-point Geostatistical Models to Improve Reproduction of Training Patterns* Springer Netherlands.

KONCEPTUEL MODEL FOR FORURENINGSFORDELING OG PROCESSER FOR CHLOREREDE OPLØSNINGSMIDLER I MORÆNELER. HAR VI ET SAMLET OVERBLIK?

Lektor Mette M. Broholm¹
Ph.d.-studerende Ida Damgaard¹
Ph.d.-studerende Cong Lu (tidl.)¹
Ph.d.-studerende Julie Chambon¹
Forskningsprofessor Carsten S. Jakobsen²
Professor Daniel Hunkeler³
Forsker Jakob Bælum²
Ph.d.-studerende Simon Jeannotat³
Civilingeniør, ph.d, Nina Tuxen⁴
Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen⁵
Lektor Charlotte Scheutz⁴
Professor Philip J. Binning¹
Professor Poul L. Bjerg¹

¹DTU Miljø

²GEUS

³U. Neuchatel

⁴Orbicon A/S

⁵Region Hovedstaden

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUMÉ

Der er i REMTEC projektet opnået en betydelig større viden om betydende processer for transport og specielt for nedbrydning af chlorerede ethener og ethaner i moræneler. Sorption i moræneler er relativt høj. Specifikke nedbrydere kan spredes i matrix i moræneler, hvilket muliggør større og mere dynamisk udbredelse af bioaktive zoner i matrix. Chlorerede ethener og ethaner kan nedbrydes abiotisk, såvel som biotisk, i moræneler med potentielt lille dannelse af problematiske mellemprodukter. Dette kan være af betydning for risikovurdering af de forurenede lokaliteter og for potentialet for afværgetiltag. Bestemmelse af stabile isotoper samt specifikke nedbrydere og aktivitet er væsentlige for procesforståelsen.

INDLEDNING

Chlorerede opløsningsmidler er blandt de oftest trufne industrielle forureninger i jord og grundvand. I Danmark er moræneler en af de mest udbredte aflejringstyper. Forurening med chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter heraf i moræneler kan udgøre en langvarig kilde til påvirkning af underliggende grundvandsmagasiner. Oprensning af forurenede moræneler er endvidere et meget udfordrende problem.

For at kunne vurdere risikoen for påvirkning af grundvandet og mulighederne for afværgetiltag er viden om transport og nedbrydning af chlorerede opløsningsmidler i moræneler essentiel. I REMTEC projektet er foretaget undersøgelser af processerne i moræneler ved både traditionelle og nye undersøgelsesmetoder, herunder analyser for specifikke mikrobielle nedbrydere og aktivitet samt isotopfraktionering.

Formålet med de udførte undersøgelser har været at opnå større viden om væsentlige processer af betydning for transport og nedbrydning af chlorerede opløsningsmidler i moræneler med henblik på at forbedre grundlaget for risikovurdering og vurdering af effekten af stimuleret reduktiv dechlorering som afværgetilgangsmetode samt af potentielle relaterede tiltag. Endvidere er foretaget en vurdering af de nye undersøgelsesmetoder.

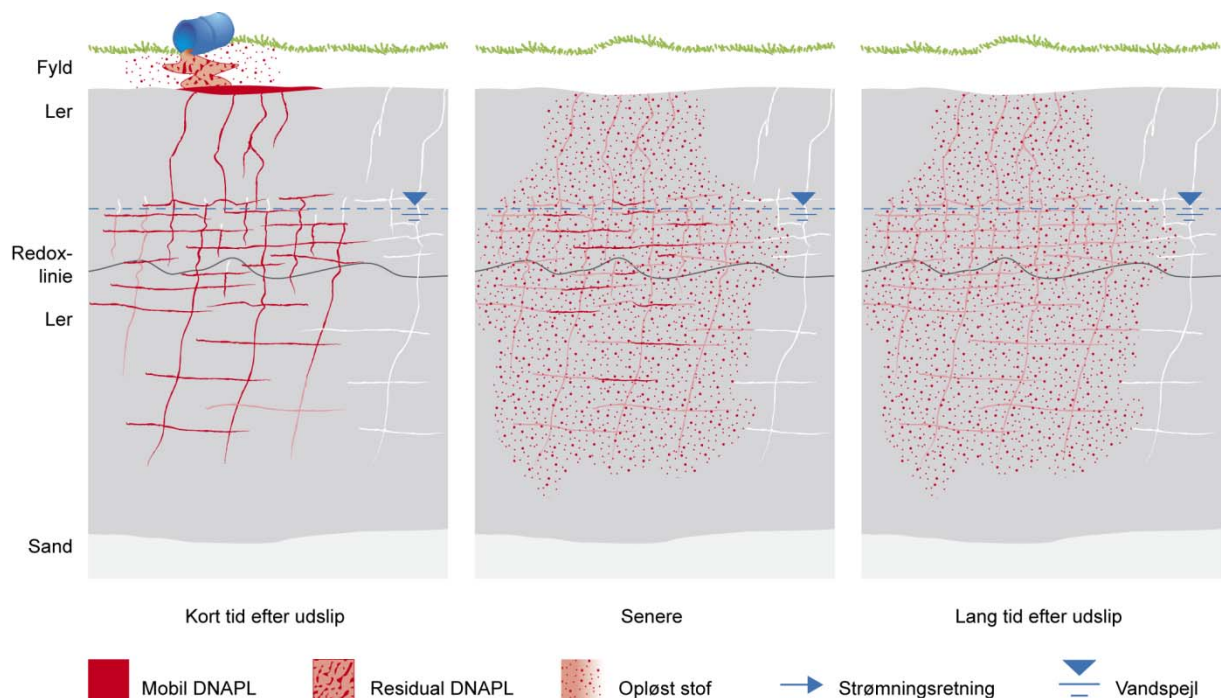
KONCEPTUEL MODEL

Chlorerede opløsningsmidler er ikke vand-blandbare væsker, og de er tungere end vand, også kendt som DNAPLs (dense non-aqueous phase liquids). Ved udslip vil DNAPL spredes som en separat væskefase ned gennem jorden (Jørgensen et al. 2010, Bjerg et al. 2011). Ved møde med moræneler kan ske en ophobning af mobil DNAPL på overfladen og derfra ske en nedtrængen i sprækker eller andre permeable features i moræneleren. I moræneleren sker videre udbredelse af DNAPL i såvel horisontale som vertikale sprækker samt sandlenser og sandslirer. Ved gennemgående vertikale sprækker kan DNAPL trænge ned i et underliggende magasin/lag. En konceptuel model for spredningen af DNAPL i moræneler er vist i figur 1.

Da chlorerede opløsningsmidler har en relativt høj opløselighed, vil opløsning fra DNAPL resultere i meget høje vandige koncentrationer i preferentielle strømningsveje, såsom sprækker samt sandslirer og -linser, med DNAPL. Som følge af koncentrationsgradienten mellem disse strømningsveje og morænelermatrix vil ske en initielt hurtig diffusion ind i og sorption til matrix. Herved kan i tynde sprækker og sandslirer ske en fuldstændig opløsning af DNAPL indenfor få år, mens det tager væsentligt længere tid i tykkere (mm-cm skala) geo-

logiske lag. Efter årtier, som der ofte er gået fra udslip er sket til de undersøges, kan alt DNAPL i moræneleren potentielt være opløst fuldstændig. Se konceptuel model i figur 1.

Ved nedsivning af uforurenet vand gennem de høppermeable lag i moræneleren, efter DNAPL er forsvundet, vil der ske tilbage-diffusion af stofferne fra matrix. De opløste og sorberede chlorerede opløsningsmidler i matrix udgør således en "sekundær" kilde, som vil påvirke underliggende grundvandsmagasiner i meget lang tid. Varigheden (og det samlede omfang) af tilbage-diffusion af chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter afhænger af sorptionen af disse i matrix.



Figur 1. Konceptuel model for spredning af chlorerede opløsningsmidler som DNAPL i moræneleraflejring og efterfølgende opløsning og diffusion ind i matrix (fra Jørgensen et al., 2011).

SORPTION

Tidligere feltundersøgelser (Jørgensen et al. 2007) har indikeret, at sorptionen til moræneler var større end forudset ved brug af generelle sorptionssammenhænge med indholdet af organisk kulstof (f_{oc}) for andre jord-/aflejringsstyper. For at dokumentere dette og kvantificere sorptionen af såvel nedbrydningsprodukter som moderstofferne udførte Lu et al. (2011) en serie sorptionsforsøg med moræneler fra 3 danske lokaliteter (gengivet på dansk i Broholm et al., 2011). De bestemte sorptionskoefficienter er givet i tabel 1.

Følgende sammenhænge for sorption af chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter til moræneler blev bestemt af Lu et al. (2011) ved lineær regression af dataene:

$$\log K_d = 0.590 \log K_{ow} - 1.561$$

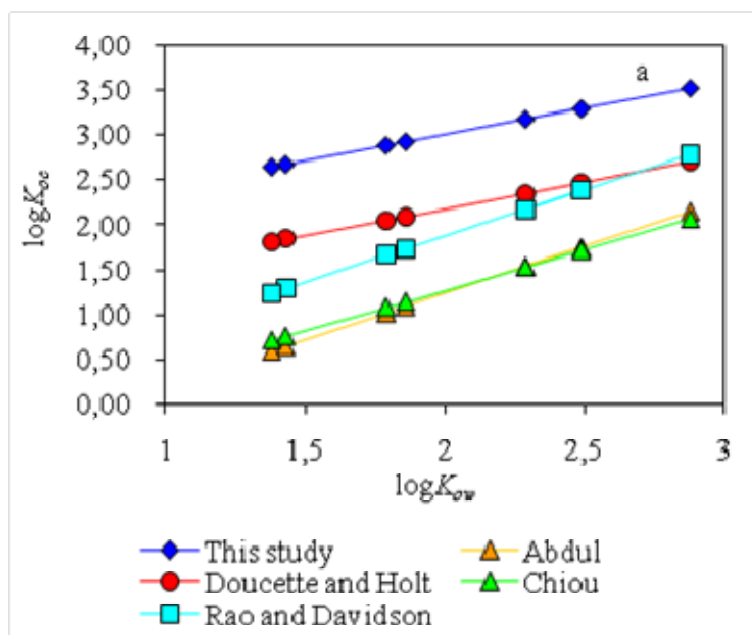
$$\log K_{oc} = 0.590 \log K_{ow} + 1.824, K_d = f_{oc} \cdot K_{oc}$$

Da f_{oc} for alle prøverne var meget lav og omtrent ens (0,02-0,08%), anbefales den direkte sammenhæng mellem K_d og K_{ow} (fed font) anvendt for moræneler.

Tabel 1: K_d værdier for sorption af chlorerede ethener og ethaner til moræneler fra 3 danske lokaliteter. O: oxideret (forvitret) zone, R: reduceret (uforvitret) zone (Fra Lu et al., 2011).

K_d	PCE	TCE	cDCE	VC	TCA	DCA	CA
Vasbyvej O	0,84- 1,03	0,29- 0,91	0,17- 0,50	0,12- 0,24	0,20	0,16	0,13
Vasbyvej R	1,81- 2,45	0,62- 0,81	0,28- 0,29	0,12- 0,19	0,41- 0,45	0,22- 0,24	0,12- 0,18
Rugårdsvej R	2,16- 2,41	0,91- 0,96	0,74- 0,82	0,23- 0,36			
Høje Taastrup Vej O	1,55	0,82	0,62	0,31			

Sorptionen til moræneler var høj sammenholdt med andre sedimenttyper ved tilsvarende f_{oc} . Dette er illustreret ved sammenligning med ofte anvendte generelle sorptionssammenhænge for bl.a. chlorerede opløsningsmidler i figur 2. Den høje sorption resulterer i væsentlig langsommere tilbagediffusion fra matrix end tidligere forventet på basis af de generelle sammenhænge.



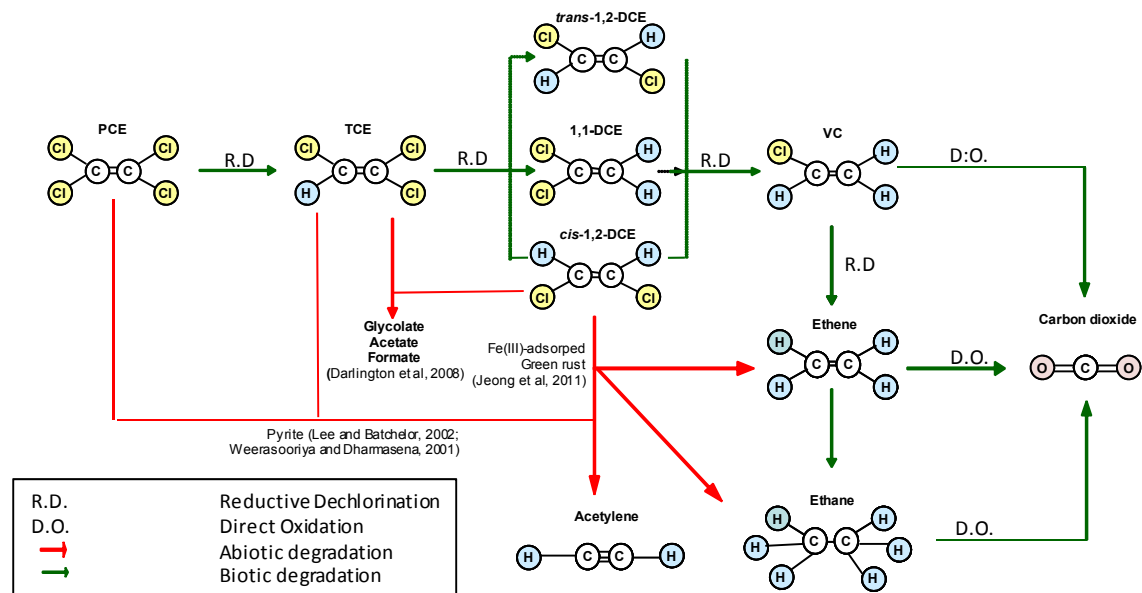
Figur 2. Sorption til moræneler (this study) er høj sammenholdt med andre sedimenttyper ved tilsvarende f_{oc} illustreret ved ofte anvendte generelle sorptionssammenhænge for bl.a. chlorerede opløsningsmidler (fra Lu et al., 2011).

NEDBRYDNING

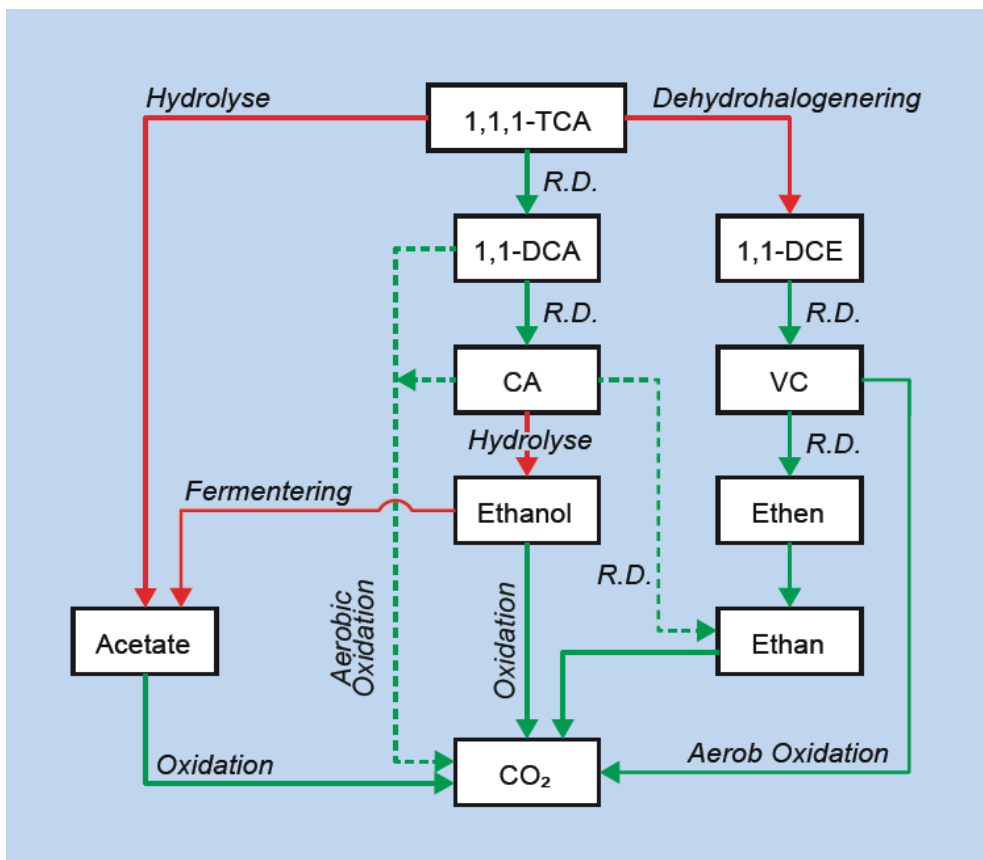
Biotisk nedbrydning ved reduktiv dechlorering

Biotisk nedbrydning af de chlorerede opløsningsmidler PCE, TCE og 1,1,1-TCA kan ske ved sekventiel reduktiv dechlorering, som illustreret i figur 3 henholdsvis 4 (angivet med grønne pile med R.D.). For PCE og TCE kan ske komplet reduktion til ethen/ethan, mens nedbrydning af 1,1,1-TCA ved reduktiv dechlorering standser ved CA.

Dette er tidligere beskrevet i større detalje af Bjerg et al. (2006) og Scheutz et al. (2011). Nedbrydningen kræver anaerobe forhold, tilstedeværelse af en donor samt af specifikke nedbrydere.



Figur 3. Biotisk nedbrydning ved reduktiv dechlorering samt abiotisk nedbrydning af chlorerede ethener (fra Damgaard, 2012).



Figur 4. Biotisk nedbrydning ved reduktiv dechlorering samt abiotisk nedbrydning af chlorerede ethaner (fra Scheutz et al., 2011).

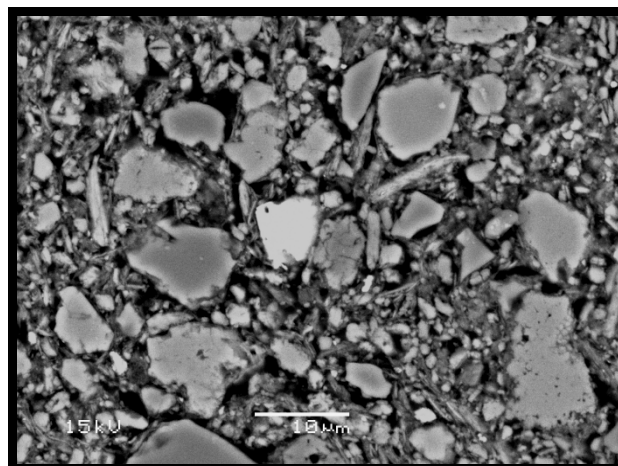
Spredning af dechlorerende bakterier

Nedbrydning af chlorerede ethener kræver tilstedeværelse af dehalogenerende bakterier. Flere forskellige typer kan nedbryde PCE og TCE til DCE (primært cis-DCE), mens kun *Dehalococcoides sp.* (Dhc) kan nedbryde cis-DCE og kun Dhc med vinylchlorid reduktase gener (*vcrA* og *bvcA*) kan nedbryde VC. For de chlorerede ethaner menes en type *Dehalobacter sp.* (Dhb) at være essentielle for nedbrydning af 1,1,1-TCA til CA.

Det er kendt, at de specifikke nedbrydere (Dhc og Dhc *vcrA*) træffes i grundvand på lokaliteter med forurening med chlorerede opløsningsmidler og reducerede forhold (Scheutz et al., 2006). Det var imidlertid uvist, om de er små nok til at kunne spredes til matrix i moræner.

Ved et litteraturstudie fandt Lu et al. (2012), at dehalogenerende bakterier (Dhc, Dhb, m.fl.) har en diameter på mellem 0,2 og 1 µm. Dhc er coccoidtformede (tallerken, diameter 0,5-1 µm) og Dhb (restrictus) er stavformede (stav, diameter 0,2-0,5 µm, længde 2-3 µm).

Moræner fra 3 danske lokaliteter (Vasbyvej, Gl. Kongevej og Sortebrovej) blev undersøgt ved BSEM undersøgelse af polerprøver af lermatrixprøver, et eksempel er vist i figur 3.



Figur 3. Eksempel på mikroskopi (BSEM) af en polerprøve af morænelermatrix, som illustrerer størrelsen af makroporøsiteten i matrix (fra Lu et al., 2012).

For de undersøgte morænelerprøver fra oxideret og reduceret zone på 2 danske lokaliteter fandt Lu et al. (2012) en makroporøsitet, porestørrelser i intervallet 1-10 μm , på 30-50% af den totale porøsitet. Der er således tilsyneladende ikke nogen størrelsesmæssig restriktion på udbredelse af specifikke nedbrydere i morænelermatrix.

Abiotisk nedbrydning

Abiotisk nedbrydning af chlorerede ethener og ethaner kan ske ved reaktion med visse naturligt forekommende reducerede jernforbindelser (fx grøn rust eller jernsulfid), som kan dannes mikrobielt ved reduktion af miljøet (fx Broholm et al., 2012). Abiotiske nedbrydningsveje er angivet ved røde pile på figur 3 og 4. Biotisk medieret abiotisk nedbrydning kan således bidrage til nedbrydningen og medfører væsentligt mindre dannelse af problematiske mellemprodukter. Under naturlige forhold er den abiotiske nedbrydning oftest langsom. Ved fravær eller meget lav aktivitet af specifikke nedbrydere, fx som følge af utilstrækkeligt reducerede forhold eller toksiske koncentrationsniveauer, kan naturlig abiotisk nedbrydning være af betydning. Der er et potentiale i stimulering af biotisk medieret abiotisk nedbrydning samt i direkte anvendelse af reducerede jernforbindelser, med potentielt væsentligt hurtige reaktion, ved afværgetiltag.

UNDERSØGELSER

Naturlige processer i moræneler er undersøgt ved feltundersøgelser på lokaliteten Vasbyvej i Hedehusene, hvor udslip af vandopløselige organiske stoffer og kulbrinter såvel som af chlorerede opløsningsmidler er sket for årtier siden. Undersøgelserne har omfattet prøvetagning af grundvand og morænelerkerner. Der er foretaget diskretiseret delprøvetagning af lerkerne. Foruden traditionelle analyser for chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter samt fede syrer og redoxparametre har undersøgelserne omfattet stofspecifikke analyser af stabile isotoper (isotopfraktionering, se fx Broholm et al., 2009) samt analyser for specifikke nedbrydere, gener og aktivitet. For analyser for specifikke nedbrydere er udviklet en ny forbedret ekstraktionsmetode (Bælum et al., 2011) samt en metode til bestemmelse af aktivitet for specifikke nedbrydere med gener for vinylchlorid reductase (*vcrA* og *bvcA*). Aktiviteten udtrykkes som mRNA/DNA, hvor DNA er et mål for antallet af specifikke nedbrydere

med det specifikke gen, mens mRNA er et udtryk for antallet af beskeder, cellen giver om at producere det for nedbrydningen essentielle enzym. Analyserne for specifikke nedbrydere og anvendelsen af aktivitetsbestemmelser er beskrevet af Jacobsen et al. (2010) og Bælum et al. (2010). Ved præsentationen beskrives de nye metoder.

UDBREDELSE OG NEDBRYDNING AF CHLOREREDE ETHENER OG ETHANER I MORÆNELER MATRIX OG GRUNDVAND

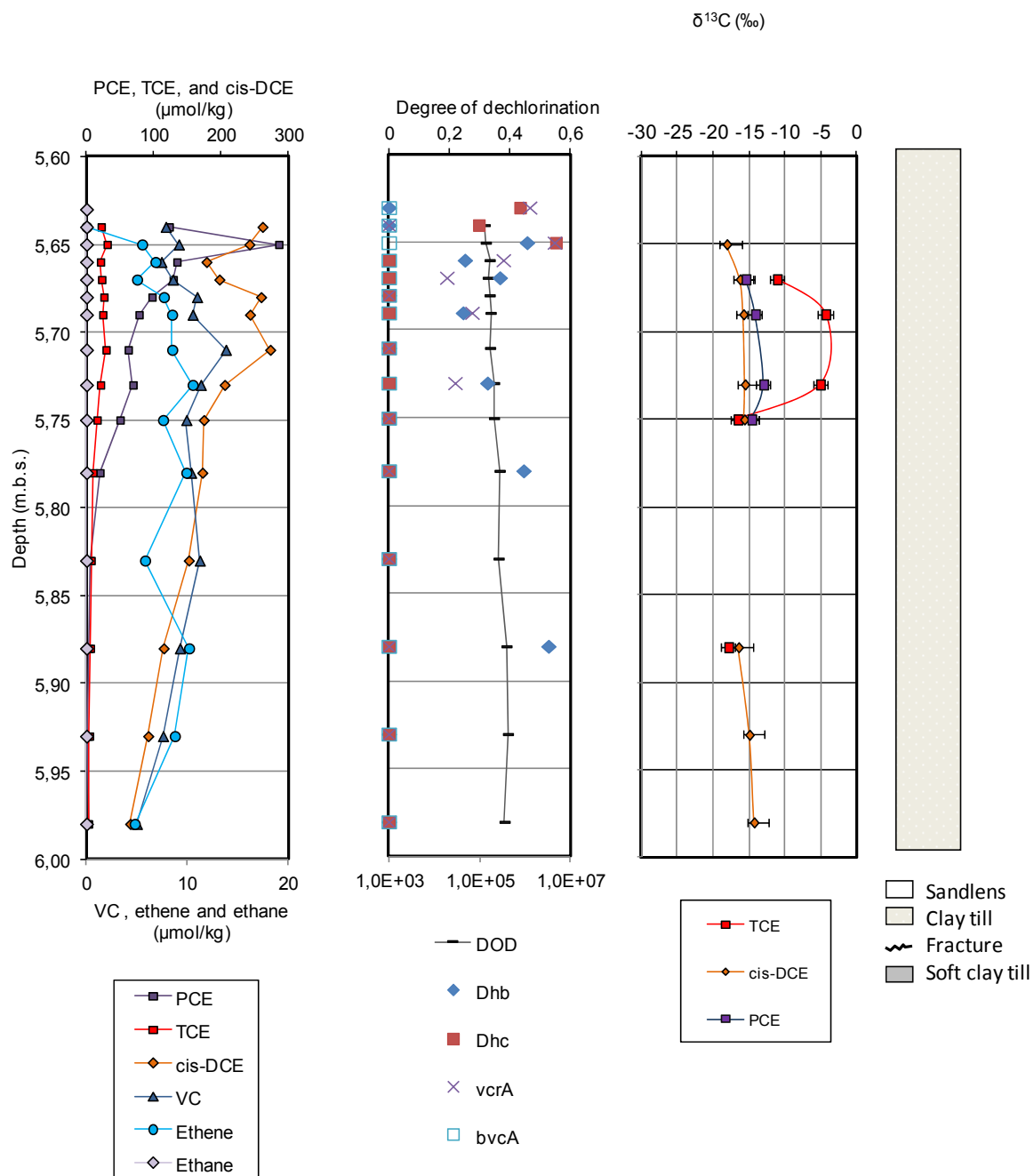
Foreløbige resultater af undersøgelserne af morænelerkerner og grundvand fra Vasbyvej er illustreret ved et eksempel på et detaljeret profil fra en kerne i figur 5 og grundvandsdata i tabel 6, yderligere eksempler gives og dataene diskuteres nærmere ved præsentationen. Bestemmelse af aktivitet for specifikke nedbrydere lykkedes kun ved analyse af grundvandsprøver.

I morænelermatrix såvel som grundvand på Vasbyvej er det overvejende cis-DCE og 1,1-DCA, som er de dominerende stoffer. Det indikerer udbredt nedbrydning af PCE og/via TCE til cis-DCE (bl.a. figur 5) henholdsvis af 1,1,1-TCA til 1,1-DCA i matrix såvel som i sprækker og sandlenser og –slirer, men med en begrænsning i den videre sekventielle nedbrydning. Betydelige antal af Dhc er truffet i en hel del matrixprøver, hvilket stemmer godt med at de kan være ansvarlige for nedbrydning af PCE/TCE og 1,1,1-TCA, men ikke for nedbrydning af cis-DCE.

I dele af kernerne og i flere af grundvandsprøverne træffes også VC og ethen om end i relativt lave koncentrationsniveauer sammenholdt med cis-DCE. I lermatrix er disse nedbrydningsprodukter ikke associeret med sprækker, sandlinser eller sandslirer, men der er et vist sammenfald mellem områder med videre nedbrydning og med fermentering og reduktion af miljøet. Dette indikerer, at der sker videre nedbrydning i dele af matrix, og at det er et komplekst dynamisk system. Udbredelsen af Dhc, *vcrA* og *bvcA* i antal over detektionsniveau er beskeden (figur 5), hvilket stemmer overens med lille/langsom nedbrydning af cis-DCE via VC til ethen.

Ekstremt høj isotopfraktionering for 1,1,1-TCA dokumenterer omtrent komplet nedbrydning af stoffet og indikerer, at stoffet til dels er nedbrudt ved en abiotisk proces (data ej illustreret). En ikke ubetydelig berigelse i ¹³C af 1,1-DCA uden dannelse af CA kan relateres til, at det stammer fra biotisk nedbrydning af allerede ¹³C-beriget 1,1,1-TCA, som følge af indledende abiotisk omsætning af 1,1,1-TCA (diskuteret i Broholm et al., 2012).

Betydelig isotopfraktionering af cis-DCE i matrix (bl.a. figur 5), herunder i dele uden detektion af VC (og ethen) eller detektion af Dhc eller *vcrA* eller *bvcA*, dokumenterer nedbrydning ved en anden proces end biotisk reduktiv dechlorering og indikerer, at der er tale om abiotisk nedbrydning.



Figur 5. Eksempel på resultater for chlorerede ethener, specifikke nedbrydere og isotopfraktionering ved diskretiseret delprøvetagning af kerne fra Vasbyvej lokaliteten udtaget ca. 50 år efter forureningen er sket (Damgaard et al., 2012).

Grundvandsdata fra 3 delområder på Vasbyvej (tabel 6) giver et overordnet indtryk af den meget store rumlige variation i processerne som kan ses i sammenhæng med variation i forureningsfordeling herunder koncentrationsniveau. I område A optræder ekstremt høje kon-

centrationer af TCE, svarende til at der er (eller har været) DNAPL tilstede. En isotopsammensætning for TCE svarende til initielle sammensætning på trods af betydelige koncentrationer af nedbrydningsproduktet cis-DCE indikerer i god sammenhæng hermed, at der fortsat sker opløsning eller desorption af TCE. Dechlorerende bakterier under detektionsniveau og samtidig berigelse af cis-DCE indikerer abiotisk nedbrydning. I område B og C er koncentrationerne lavere, og der er betydelige antal Dhc og Dhb og aktivitet af specifikke nedbrydere med specielt *vcrA* gen. Her er således en betragtelig biotisk nedbrydningsaktivitet. Samtidig viser en høj isotopfraktionering for cis-DCE specielt i B, at også abiotisk nedbrydning formentlig er betydelig. I C er der mindre berigelse for 1,1-DCA, det kan tyde på, at biotisk nedbrydning har været af relativt større betydning for nedbrydningen af 1,1,1-TCA sammenholdt med abiotisk i forhold til fx område A.

Tabel 6. Specifikke nedbrydere og aktivitet samt isotopfraktionering for vandprøver fra Vasbyvej

Borehole	A		B2		C	
Screen depth (m u.t.)	5,1-6	8,1-9	11-13	5,5-5,8	8-8,9	11,1-12
Dhc (cells/L)	<	<	2.1×10^7	8.4×10^4	1.5×10^7	<
Dhb (cells/L)	<	<	2.5×10^6	1.3×10^6	2.4×10^5	3.4×10^5
Activity of <i>vcrA</i>	<	<	17	10	10	<
Activity of <i>bvcA</i>	<	<	3	<	<	<
$\delta^{13}\text{C}$ TCE (‰)	<	-30,7	BD	<	<	<
$\delta^{13}\text{C}$ cis-DCE (‰)	-26,9	-24,0	-4,8	-16,1	-15,7	<
$\delta^{13}\text{C}$ 1,1-DCA (‰)	-20,6	-19,1	-20,6	-21,8	-21,3	-24,3

Dhc: Dehalococcoides sp., Dhb: Dehalobacter sp., < antal eller koncentration under detektionsniveau

KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

Fordelingen af chlorerede ethener og ethaner i moræneler er meget varieret, som forventet på grund af den meget heterogene transport og opløsning af DNAPL i det sprækkede medie. Mht. transport er det vist at sorptionen til moræneler er højere end til andre sedimenttyper ved tilsvarende indhold af organisk stof. Dette er af betydning for specielt matrixdiffusion og giver anledning til mere langvarige sekundære kilder i moræneler og til potentielt langsommere oprensning.

Det viser sig endvidere, at nedbrydningsprocesserne rumligt varierer meget. Således at abiotiske såvel som biotiske processer er af betydning, og at der er betydelig forskel i omfanget af nedbrydning. Såvel abiotisk som biotisk nedbrydning varierer med forholdene, hvilket indikerer, at de abiotiske processer kan være biotisk medierede. Det er tilsyneladende et dynamisk system, hvor specielt biotisk nedbrydning udvikles i forskellige dele af matrix afhængig af forholdene. Nedbrydningen er ikke begrænset til højpermeable features eller zoner omkring disse, men snarere af varierende adgang til donor, tilgængelighed af rette redoxforhold og chlorerede ethener/ethaner, men også påvirket af evt. inhiberende niveauer af stofferne.

Den relativt høje sorption resulterende i langsom tilbagediffusion fra matrix kombineret med potentiel abiotisk nedbrydning med ingen eller lille dannelse af problematiske mellemprodukter, som CA og VC, er af betydning for risikovurderingen mht. påvirkning af grundvandsma-

gasiner under de forurenede lokaliteter. Der bør således tages højde for dette ved undersøgelser og evt. modellering for risikovurdering.

På sin vis giver denne dynamik bedre potentiale for at stimuleret biotisk nedbrydning kan udbrede sig til hele matrix, men det ændrer ikke ved, at der er behov for meget tæt tilførsel af donor og nedbrydere. Det giver anledning til, at der kan tænkes i optimering af donor/donorsammensætning, så der opnås god spredning i matrix ved diffusion måske på bekostning af varighed af donor. Den store variabilitet betyder at selvom der i områder kan være høje antal af specifikke nedbrydere på forhånd, må det anbefales at bioaugmentere, så der sikres fornøden udbredelse i hele området. Man bør være opmærksom på at også abiotisk nedbrydning kan have betydning og potentielt kan stimuleres af biotisk medieret proces eller ved tilsætning af reaktive jernforbindelser.

Anvendelsen af isotopfraktionering har været med til at give indsigt i nedbrydning i matrix og har været afgørende for erkendelsen af, at også abiotisk nedbrydning af chlorerede ethener og ethaner er af stor betydning i lermatrix. Bestemmelse af specifikke nedbrydere og gener har været betydende for vurdering af den dynamiske udvikling i matrix og forståelse af nedbrydningstyper. Bestemmelse af aktivitet er endnu på udviklingsstadiet og endnu ikke anvendeligt i matrix. Det er imidlertid meget lovende, og bestemmelse af aktivitet på grundvandsprøver har været betydende for vurdering af rumlig variation i nedbrydning mellem delområder.

TAK

De præsenterede resultater er finansieret af forskningsprojektet "Innovative Remediation and Assessment Technologies for Contaminated Soil and Groundwater" (REMTEC). Forfatterne takker teknikere på DTU Miljø og GEUS for assistance i felt og laboratorium.

REFERENCER

- Bjerg, P.L., Broholm, M.M., Lange, I.V., Trolborg, M., Janniche, G.S., Lemming, G., Santos, M., Binning, P.J., 2011. Forekomst af fri fase og kvantificering af forureningsflux for chlorerede opløsningsmidler. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, og Region Hovedstaden. www.sara.env.dtu.dk
- Bjerg, P.L., Hansen, M.H., Christiansen, C., Scheutz, C., Broholm, M.M., (2006). Anaerob dechlorering og oprensning af lavpermeable aflejringer. Institut for Miljø og Ressourcer, DTU og Københavns Amt, p. 23. www.sara.env.dtu.dk
- Bælum, J., Nicolaisen, M.H., Sørensen, J., Jacobsen, C.S., 2010 Bestemmelse af aktiviteten af specifikke mikrobielle phenoxysyre – pesticid nedbrydere. In: Naturlig og stimuleret biologisk nedbrydning - processer og mikrobiologi, 21. april 2010, pp. 31-38. ATV Jord og Grundvand, Kgs. Lyngby.
- Bælum, J., Scheutz, C., Broholm, M.M., Jacobsen, C.S., 2011. Extraction of nucleic acids from trichloroethene (TCE) degrading bacteria in extremely clayey groundwater sediments (Abstracts proceedings of the 5th Annual Meeting of The Danish Water Research Platform (DWRP) – Forskningsplatformen Vand — Annual Meeting of The Danish Water Research Platform, 2011
- Broholm, M.M., Hunkeler, D., Tuxen, N., Jeannotat, S., Scheutz, C., 2012. Stable carbon isotope ratio assessment of biotic and abiotic degradation of 1,1,1-trichloroethane. Manuskript.

- Broholm, M.M., Hunkeler, D., Abe, Y., Jeannotat, S., Aravena, R., Westergaard, C., Jakobsen, C.S., Bjerg, P.L. (2009). Vurdering af naturlig nedbrydning af PCE i grundvandsmagasin ved isotopfraktionering. Miljøstyrelsen, København, Miljøprojekt nr. 1262. <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2009/>
- Broholm, M.M., Lu, C., and Bjerg, P.L., 2011. Sorption af chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter i moræneler. Jordforurening.info, p2-5. Videncenter for Jordforurening. www.jordforurening.info
- Damgaard, I. (2012). Natural attenuation and enhanced reductive dechlorination in clay till contaminated with chlorinated solvents. PhD afhandling. Manuskript.
- Damgaard, I., Bjerg, P.L., Bælum, J., Scheutz, C., Hunkeler, D., Jakobsen, C., Tuxen, N., Broholm, M.M., 2012. Identification of degradation zones in clay till by high resolution chemical, microbial and compound specific isotope analysis. Manuskript.
- Jakobsen, C.S., Bælum, J., Scheutz, C. & Broholm, M.M. (2010): Mikrobiel dechlorering af TCE - molekylære teknikker til bestemmelse af tilstedeværelse og aktivitet af specifikke nedbrydere. In: Naturlig og stimuleret biologisk nedbrydning - processer og mikrobiologi, 21. april 2010, pp. 31-38. ATV Jord og Grundvand, Kgs. Lyngby.
- Jørgensen, I.V., Broholm, M.M. & Bjerg, P.L. (2010): DNAPL i kildeområder - konceptuelle modeller, karakterisering og estimering af forureningsmasse. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden, Kgs. Lyngby. www.sara.env.dtu.dk
- Jørgensen, T.H., Nissen, L., Nielsen, L., Weeth, E.B., Scheutz, C., Broholm, M.M., Bjerg, P.L., Durant, N.D., Cox, E., Christophersen, M., Rasmussen, P. (2007). Oprensning af klorerede opløsningsmidler i moræneler med stimuleret reduktiv deklorering – pilotforsøg: Hovedrapport – Lok. Nr. 461-169. Rugårdsvej 234-238, 5210 Odense NV. COWI, DTU, Geosyntec, Region Syddanmark 2007. www.sara.env.dtu.dk
- Lu, C., Bjerg, P.L., Zhang, F., Broholm, M.M. (2011). Sorption of chlorinated solvents and degradation products on natural clayey tills. Chemosphere, 83, 1467-1474.
- Lu, C., Broholm, M.M., Bjerg, P.L. (2012). Manuskript.
- Scheutz, C., Durant, N., Hansen, M.H., Bjerg, P.L., 2011a. Natural and enhanced anaerobic degradation of 1,1,1-trichloroethane and its degradation products in the subsurface – a critical review. Water Research, 45(9), 2701-2723.
- Scheutz, C., Begtrup, E., Bjerg, P.L. (2006). Udbredelsen af Dehalococcoider i danske grundvandsakviferer. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden, Kgs. Lyngby. www.sara.env.dtu.dk

RISK ASSESSMENT IN FRACTURED CLAYEY TILLS – WHICH MODELING TOOLS?

Ph.D. student Julie C. Chambon
Professor Poul L. Bjerg
Professor Philip J. Binning

DTU Environment
Technical University of Denmark

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

ABSTRACT

The article presents different tools available for risk assessment in fractured clayey tills and their advantages and limitations are discussed. Because of the complex processes occurring during contaminant transport through fractured media, the development of simple practical tools for risk assessment is challenging and the inclusion of the relevant processes is difficult. Furthermore the lack of long-term monitoring data prevents from verifying the accuracy of the different conceptual models. Further investigations based on long-term data and numerical modeling are needed to accurately describe contaminant transport in fractured media and develop practical tools with the relevant processes and level of complexity.

INTRODUCTION

Many contaminated sites in Denmark that represent a risk of leaching to the groundwater occur in areas with low-permeability fractured clayey tills at the land surface (Christiansen et al., 2010; Bjerg et al., 2006; Chambon et al., 2009). Fractured media are important to consider when assessing risk to groundwater at contaminated sites, because of the potential for fast downward movement of contaminants along preferential pathways (vertical fractures) and associated diffusion into the porous matrix. Contaminant transport to an underlying aquifer through such media is controlled by complex processes, resulting in potential fast breakthrough along fractures and large storage capacity in the porous matrix (Chambon et al., 2011). In such systems, most of the contaminant mass is trapped in the low permeability matrix as dissolved and sorbed phases (Jørgensen et al., 2010), forming a secondary contamination source, which results in long-term leaching to the underlying aquifer. The development of risk assessment tools for groundwater in Denmark has led to increasing consideration on which tools are suitable to assess contaminant transport and risk in this complex geological media, which are extremely relevant with regards to Danish contaminated sites, both at the source (JAGG 1.5, Chambon et al., 2011, DTU-V1D), and catchment scales (Overheu et al., 2011a). Such risk assessment tools are also used to determine clean-up criteria when performing remediation at contaminated sites (Overheu et al., 2011b). Risk assessment is a trade-off between data availability, conceptual model complexities and results accuracy, so that risk assessment in fractured clayey tills is particularly challenging. In this study we will review the different model tools available and discuss their relevance and limitations as well as highlight the needs for future improvements.

RISK ASSESSMENT BASED ON ANALYTICAL SOLUTIONS

In risk assessment where many contaminated sites have to be screened based on few available site specific data, tools based on analytical solutions are usually preferred because limited data and software knowledge are required. However this means that some of the complex processes occurring during transport through fractured clay tills have to be disregarded in order to fit the conceptual models used in such solutions, these limitations will be discussed here and the use of more complex numerical models will be developed in the next section. The tools based on analytical solutions are presented with increasing complexities (more processes are included), which also means increasing level of knowledge (more data/parameters are required).

a. Steady-state without vertical transport (JAGG 1.5-type)

This simple approach has been widely used for risk assessment and is not specific for transport in fractured clayey tills, but has been applied to all types of geological media (JAGG 1.5,

Miljøstyrelsen, 1998). The contaminant mass flux from a contaminant source is here calculated based on the concentration measured in the source (C_0) and the net downward flow (corresponding to the net infiltration to the underlying aquifer (I) and the source area (A):

$$MF_{source} = C_0 * I * A$$

The resulting concentration in the underlying aquifer can then be calculated based on simple dilution model (C_1 and C_2 in Figure 1, JAGG 1.5). It can be seen that very few data are needed to compute risk assessment in this model (source concentration, net infiltration and source area), but vertical transport is not included (corresponding to a 0 dimension model) neither potential degradation. Furthermore the specificities of contaminant source in clayey tills are not reflected in this model, as the only site specific value is the net infiltration.

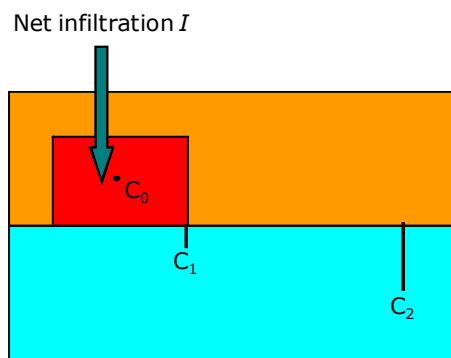


Figure 1 – Conceptual model for risk assessment a.

b. 1D vertical transport based on Equivalent Porous Media (EPM)

In this approach vertical transport to the underlying aquifer is taken into account, and the geological layer is represented by a porous media with equivalent hydraulic conductivity and porosity. The transport is one-dimensional, advection and dispersion are included and degradation can also be taken into account, and both steady-state and transient contaminant mass flux to the aquifer can be calculated. The analytical solution is based on Van Genuchten and Alves (1982). Source concentration, equivalent hydraulic conductivity, equivalent porosity, net infiltration, longitudinal dispersivity and dispersion coefficient are needed to perform risk assessment based on EPM. In case of low permeability media, the advection becomes negligible and the vertical transport is controlled by molecular diffusion only. For fractured media, the presence of vertical fractures is implicitly taken into account by an increased hydraulic conductivity, a decreased porosity and longitudinal dispersivity (Chambon et al., 2011). The main limitation of this approach is that it is based on effective parameters (conductivity, porosity and dispersivity), that do not correspond to physical properties and cannot then be measured. Therefore the use for prediction is limited because these parameters are expected to change from site to site, depending on flow physical scales and flow characteristics (Chambon et al., 2011).

c. 1D/2D transport in single fracture-porous matrix system (Chambon et al., 2011)

In this approach the presence of vertical fractures is explicitly taken into account, but the fracture network is simplified to a single fracture embedded in an infinite low permeability

porous matrix. The transport through the fractured media is one-dimensional vertically along the fracture and one-dimensional horizontally in the porous matrix. The transport in the fracture is controlled by advection, while transport in the matrix is diffusion controlled (Chambon et al., 2011). The analytical solution is based on Tang et al. (1981), both steady-state and transient contaminant mass flux can be calculated and degradation can be included (though only uniformly in the fracture and matrix). Specific parameters for the description of the fractured media are needed for this approach (fracture spacing, aperture, bulk hydraulic conductivity). Such parameters are often not available at specific sites, but they can be derived from extensive field measurements performed in fractured clayey tills Denmark (Klint, 2001 and Jørgensen et al., 2008). In contrast to the EPM approach, this tool is based on geological physical parameters, and include the specificities of transport in fractured media; fast breakthrough due to fractures and long tailings due to storage in the porous matrix. However this approach is also based on several simplifications of the real system (only vertical fully penetrating fractures, large fracture spacings, uniform degradation, no flow in the porous matrix, etc...). Therefore in a detailed site assessment, where more detailed processes are required (complex fracture networks, flow in the matrix, degradation in specific locations, sequential degradation, etc...) a numerical model might be necessary to overcome these limitations.

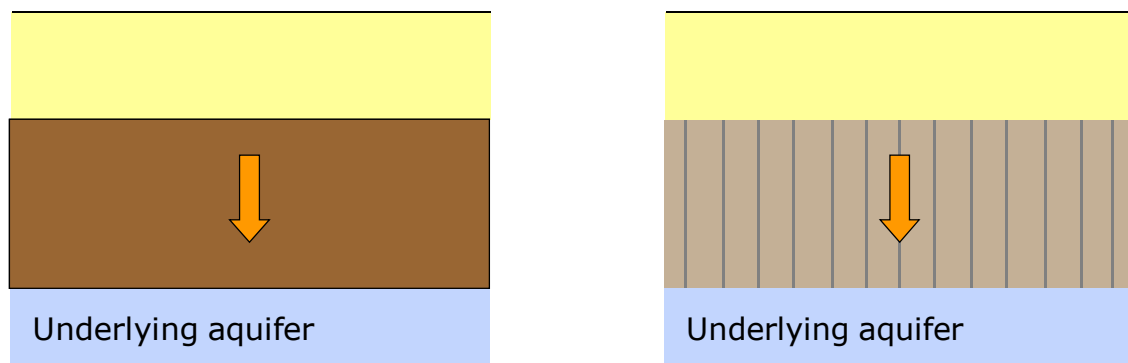


Figure 2 - Equivalent Porous Media (left) and fractured media (right)

The output from the three risk assessment tools described above are compared for the case of a typical fractured clayey till for a conservative and a degradable compound (see Figure 3). It can be seen that they give very different results. While tool a (the leaching concentration equal the source concentration) is obviously the most conservative, tools b (EPM) and c (single fracture) show different dynamics, and the notion of risk depends on the time at which it is considered. A more detailed comparison of tools b and c can be found in Chambon et al. (2011).

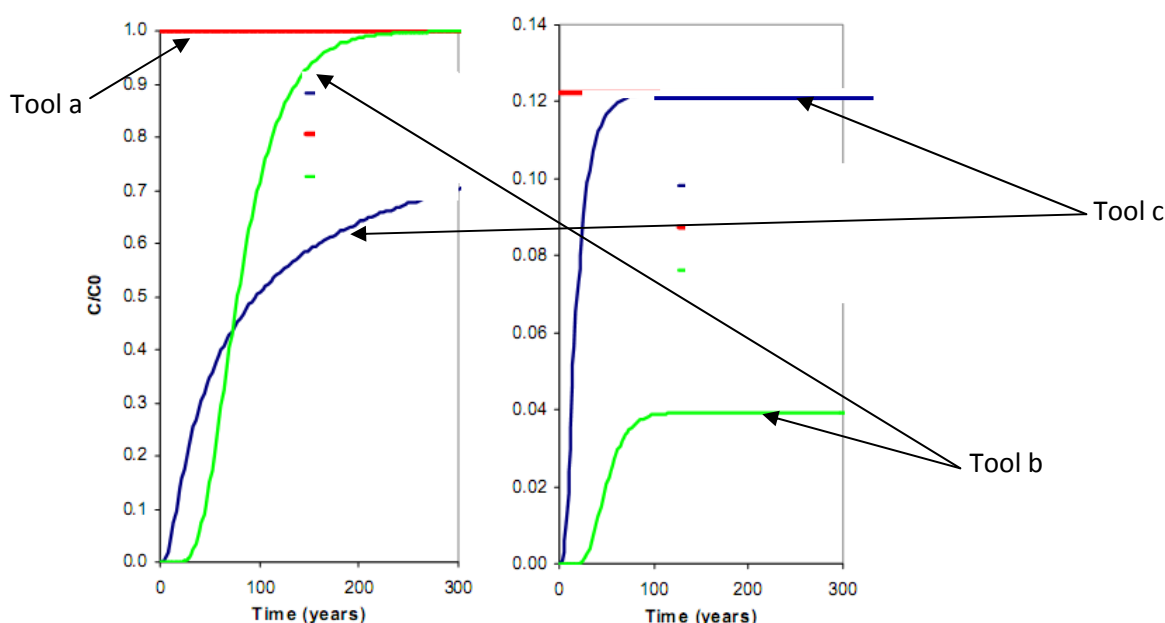


Figure 3 – Comparison of the three risk assessment output (leaching concentration) for the case of a conservative (left) and degradable (right) compound.

NUMERICAL MODELING OF HETEROGENEITIES IN CLAYEY TILLS

When a detailed risk assessment is required, numerical modeling can be used to better take into account the role of the heterogeneities in the clayey tills on contaminant transport, and risk to underlying aquifers. Such heterogeneities in clayey tills are of course vertical and horizontal fractures but also sand lenses and stringers, which can also act as preferential pathways for flow and contaminant (see Kessler et al. in this meeting). Such features can be simulated in numerical models, as shown in e.g., Westergaard et al. (2011), where a network of horizontal and vertical fractures was used to simulate contaminant transport to the aquifer in a 2D cross section. The main limitations regarding numerical modeling is again the limited site specific data usually available to accurately describe the heterogeneities in clayey tills. In order to generate geological features with no or limited field data, several methods can be used, as discussed in Kessler et al. (2012) for the case of sand lenses and stringers. The influence of the different representations of heterogeneities on contaminant transport and risk assessment needs to be assessed in order to improve the accuracy of risk assessment.

WHICH TOOLS ARE APPROPRIATE FOR CLAYEY TILLS?

A range of tools are available for risk assessment in fractured clayey tills, as presented above. Given the limited time and available data, risk assessment is a trade-off between model complexity and accuracy. However it is very challenging to verify the accuracy of the different tools presented above, given the long timeframes involved in contaminant transport in such low-permeability data. The lack of long-term monitoring data makes it difficult to compare the models and choose the most accurate (Chambon et al., 2011). Therefore the controlling processes in such fractured media are still questioned; is it advection along the fractures or diffusion in the clay matrix that controls the risk to an underlying aquifer? Numerical investigations using long term monitoring data (such as the bromide infiltration ex-

periment in Flakkebjerg, Harrar et al., 2007 or the pesticide transport in an old orchard, Jørgensen 2012 in this meeting) are necessary to develop practical tools which includes the relevant processes in the right level of complexity.

REFERENCES

Bjerg PL, Hansen MH, Christiansen C, Scheutz C, Broholm MM. Anaerob dechlorering og oprensning af lavpermeable aflejringer. 2006. Institut for Miljø og Ressourcer, DTU og Københavns Amt, p. 23. www.sara.env.dtu.dk

Chambon J, Damgaard I, Lemming G, Christiansen C, Binning PJ, Broholm MM, Bjerg PL. Stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi i moræner: Erfaringer og modellering. 2009. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, Region Hovedstaden & Miljøstyrelsen, Kgs. Lyngby.

Chambon J, Binning PJ, Jørgensen PR, Bjerg PL. A risk assessment tool for contaminated sites in low-permeability fractured media. 2011. Journal of Contaminant Hydrology 124 (1-4). 82-98.

Christiansen CM. Methods for enhanced delivery of in situ remediation amendments in contaminated clay till. 2010. PhD Thesis. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark.

DTU-V1D. Chambon J. DTU Vertical 1D Transport Model. A spreadsheet for risk assessment in low-permeability media. 2011. DTU Miljø. www.remtec.dk.

Harrar WG, Murdoch LC, Nilsson B, Klint, KES. Field characterization of vertical bromide transport in a fractured glacial till. 2007. Hydrogeology Journal 15 (8), 1473-1488.

Jørgensen IV, Broholm MM, Bjerg PL. DNAPL i kildeområder - konceptuelle modeller, karakterisering og estimering af forureningsmasse. 2010. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden, Kgs. Lyngby. www.sara.env.dtu.dk

Jørgensen PR, Klint KE, Mølgaard MR. SprækkeJagg - Regneark til risikovurdering af sprækker i moræner. 2008. Teknik og administration nr. 2. Videncenter for Jordforurening.

Jørgensen PR. Risikovurdering af pesticidforurening ved en gammel frugtplantage. 2012. ATV Jord og Grundvand, Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer - udfordringer og metoder. Mødenr. 78.

Kessler T, Klint KES, Nilsson B, Bjerg PJ. Hydrogeology in clay tills. 2012. ATV Jord og Grundvand, Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer - udfordringer og metoder. Mødenr. 78.

Klint KE. Fractures in glacial diamict deposits; origin and distribution. 2001. PhD Thesis. GEUS, Geological Survey of Denmark and Greenland.

Miljøstyrelsen. JAGG1.5. Oprydning på forurenede lokaliteter, hovedbind og appendiks. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6 og nr.7, 1998.

Overheu ND, Tuxen N, Pedersen OF, Jensen CB, Rokkjær A, Andersen JA, Aabling J, Troldborg M, Binning P, Bjerg PL. Værktøjer til brug for risikovurdering og prioritering af grundvandstruende forureninger. 2011a. Miljøstyrelsen, København. Miljøprojekt Nr. 1366, Teknologiprogrammet for jord- og grundvandsforurening.

Overheu ND, Tuxen N, Thomsen NI, Binning P, Bjerg PL, Skou H. Fastlæggelse af oprensningskriterier for grundvandstruende forureninger. 2011b. Miljøstyrelsen, København. Miljøprojekt Nr. 137. <http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2011/11/978-87-92779-20-5.pdf>

Tang DH, Frind EO, Sudicky EA. Contaminant transport in fracturedporous-media — analytical solution for a single fracture. 1981. Water Resources Research. 17 (3), 555–564.

van Genuchten MT, Alves WJ. Analytical Solutions of the One Dimensional Convective–Dispersive Solute Transport Equation. 1982. Technical Bulletin. United States Department of Agriculture.Agricultural

Westergaard C, Lemming G, Janniche GS, Chambon J, Binning P, Broholm MM, Bjerg PL, Christophersen M, Petersen J. Monitoring, modellering og miljøvurdering af fuldskala afværge af TCE forurening ved stimuleret reduktiv deklorering. 2011. Udviklingsprojekt, Region Syddanmark.

RISIKOVURDERING AF EN PESTICIDFORURENING VED EN GAMMEL FRUGTPLANTAGE

Hydrogeolog, ph.d. Peter R. Jørgensen, PJ-Bluetech ApS
Seniorforsker Niels Henrik Spliid, Aarhus Universitet, Inst. for Agroøkologi

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUME

Vi har gentaget 15 år gamle pesticidmålinger i borer i moræneler på en tidligere vaskeplads for sprøjteredskeer ved Skælskør frugtplantage. De oprindelige målinger i 1993/94 viste forekomst af høje "hot-spot" koncentrationer på næsten 1000 µg/l af phenoxherbicer, primært dichlorprop og mechlorprop, ledsaget af diffuse koncentrationer på omkring 3 µg/l af primært simazin. Der er kemisk reducerede forhold i forurenings "hot spot" og som følge deraf langsom pesticidnedbrydning. Målingerne 15 år senere (i 2007) viste et fald i "hot-spot" koncentrationer på 29-85 % for phenoxyherbiciderne og 80 % for simazin. Ved gentagelsen blev tilføjet analyser for phenoxyherbicidmetabolitter, bentazon og BAM, der viste "hot spot" koncentrationer på hhv. 178, 19 og 0,4 µg/l. Undersøgelsen viste, at "hot-spot" forureningen stort set ikke havde flyttet sig i de forløbne 15 år fordi den fortrinsvist er akkumuleret i immobil porevand i morænematrixen og fordi der en lille hydraulisk gradient gennem lerlaget. Fra "hot spot" forureningsfeltet er udvasket lave koncentrationer til det underliggende grundvand, formentlig pga. diffusion af pesticiderne fra det immobile matrixporevand ud i gennemgående strømningsaktive sprækker og indlejrede sandlag.

INDLEDNING

Dette projekt følger op på en forureningsundersøgelse fra 1993/94 af en nedlagt vaskeplads, hvor der er sket pesticidspild i forbindelse med påfyldning og rengøring af sprøjteredskeer fra en frugtplantage ved Skælskør /1/. Vaskepladsen er beliggende på godt 20 m moræneler over et regionalt grundvandsmagasin og har ikke været i brug siden omkring 1990/91, hvor med forureningen er omkring 20 år gammel eller ældre.

Vi har i 2007 gentaget forureningsmålingerne på den gamle vaskeplads i de samme monitoringsboringer som i 1993/94, samt i nye borer. Undersøgelserne blev udført i et samarbejdsprojekt mellem GEO, Lyngby og Aarhus Universitet med finansiering fra Miljøstyrelsen bekæmpelsesmiddelprogram 2006-2009 /2/.

I den tidligere undersøgelse fra 1993/94 blev jord- og vandprøver analyseret for phenoxyherbiciderne dichlorprop, mechlorprop (MCP), MCPA, 2,4-D og triazinerne simazin, atrazin og terbuthylazin. I undersøgelsen blev der fundet "hot-spot" koncentrationer næsten 1000 µg/l af phenoxyherbiciderne ned til cirka 5-7 µg/l. Disse var ledsaget af væsentligt lavere koncentrationer (under 5 µg/l) af primært simazin. Under "hot-spot" pesticidforekomsten blev der målt væsentligt lavere koncentrationer af de samme stoffer omkring drikkevandskravet (0,1 µg/l) ned til, og i, det underliggende grundvandsmagasin.

Mønsteret med høje punktkoncentrationer af phenoxyherbicider i kombination med lave diffuse koncentrationer af triaziner ligner fundmønsteret på andre vaskepladser /2/. Forureningen giver dermed muligvis et typisk billede af pesticidforurening i moræneler fra gamle vaskepladser. Der vurderes at være omkring 100.000 pesticidpunktkilder i Danmark, hvoraf en betydelig del vil være vaskepladser.

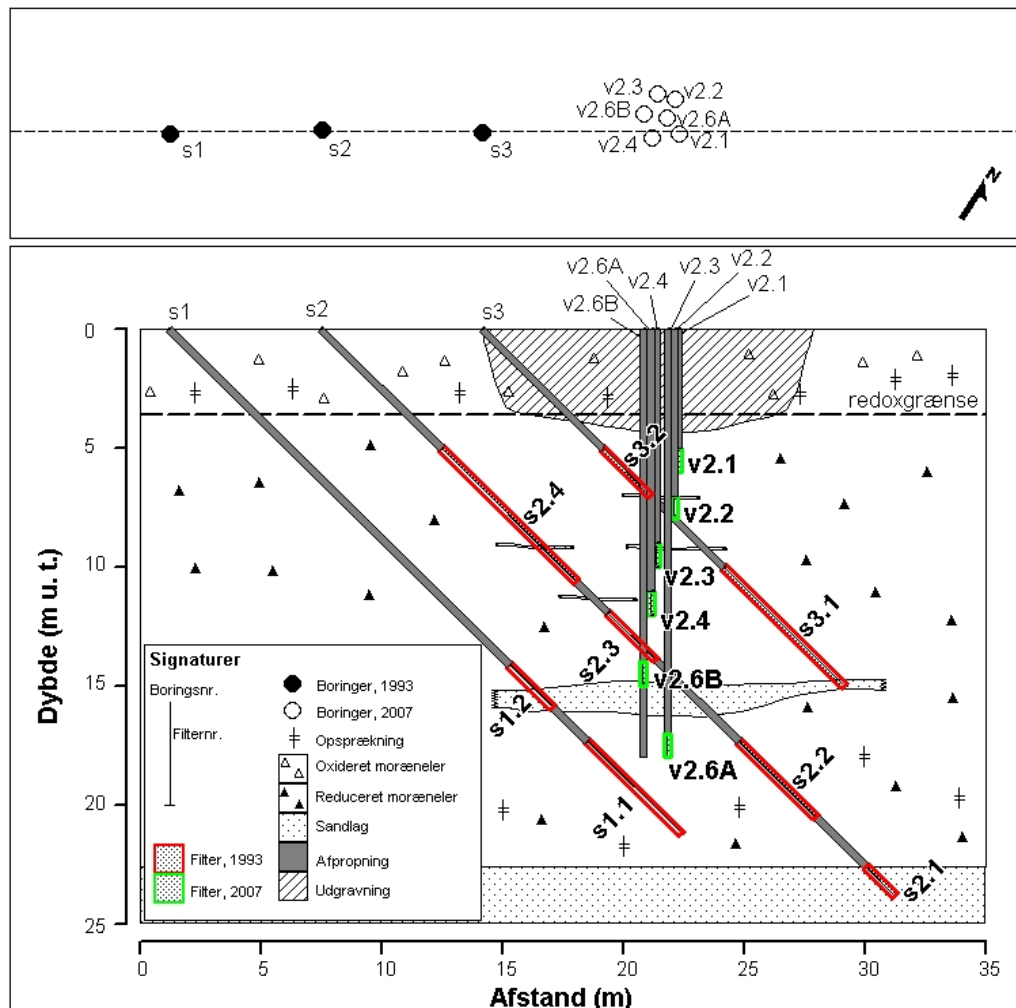
Formålet med gentagelsen af forureningsundersøgelserne i 2007 var, at:

- Undersøge den skete forureningsudvikling på vaskepladsen i løbet de mellemliggende 15 år og derigennem få et indtryk af varigheden af grundvandsforureningstruslen fra vaskepladsen.

- Undersøge de egenskaber for pesticider og jord der evt. betinger spredning og akkumulation af pesticiderne i jordsøjlen.
- Vurdere størrelsen af pesticidnedbrydning i jordsøjlen på vaskepladsen, samt udviklingen af pesticidudvaskningen til det underliggende grundvandsmagasin i modelscenarier med forskellig grundvandsstrømning og pesticidnedbrydning.

Lokalitetsbeskrivelse og undersøgelser

Pesticidforureningskilden er beliggende på godt 20 m moræneler, hvori der er observeret sprækker samt indlejrede tynde sandlag, der kan danne fortrukne strømningsveje til det underliggende regionale grundvandsmagasin. Grundvandsdannelsen til magasinet er på basis af modellering estimeret til 20-60 mm/år, hvilket er i overensstemmelse med en observeret lille nedadrette hydraulisk gradient på forureningslokaliteten /1,2/. Der er anvendt skrå og vertikale monitoringsboringer med i alt 13 prøvetagningsfiltre i morænelerslaget og 1 filter i det underliggende grundvandsmagasin, figur 1.



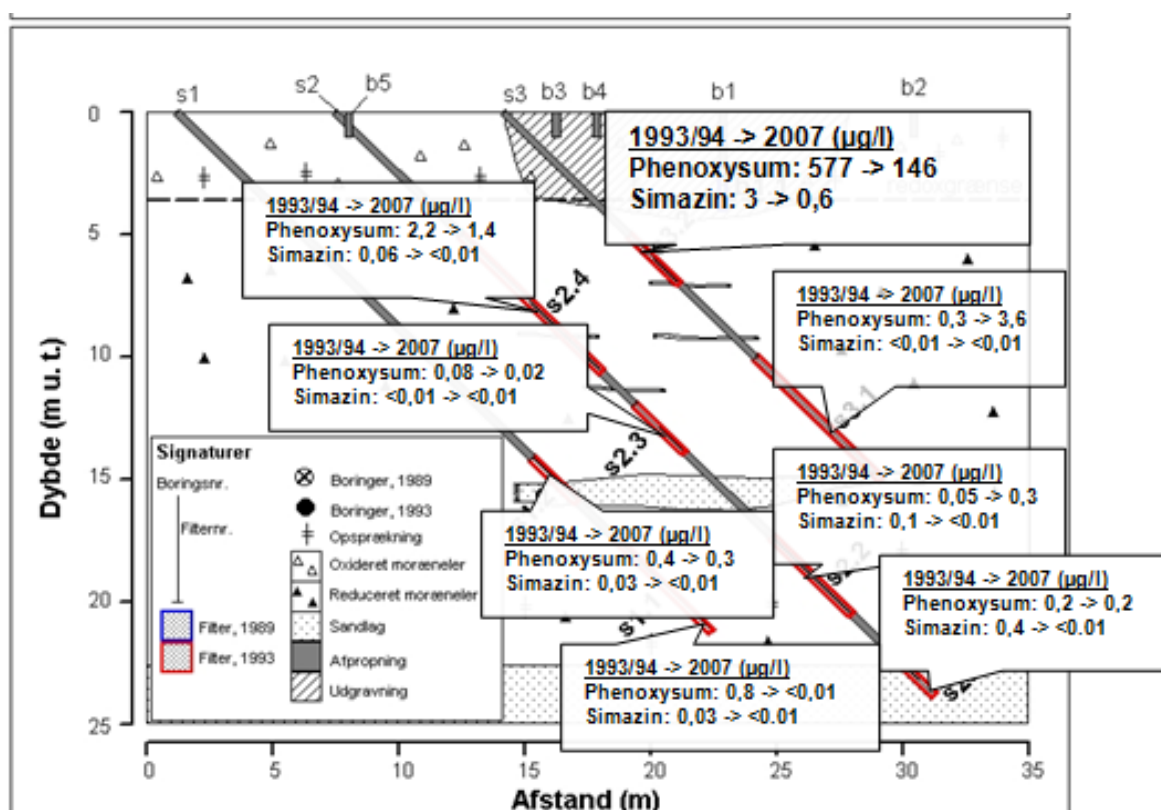
Figur 1. Geologiske tværsnit med gamle (skrå) boringer s1-s3 og nye (vertikale) boringer v2,1-6 A, B på vaskepladsen. De hydrauliske og kemiske data fra vaskepladsen i de følgende figurer repræsenterer de viste boringer og filtre.

Før etableringen af de første boringer i 1993/94 blev de øverste 4-5 m udgravet mhp. detailundersøgelser af geologi og forureningen /1/. Den opgravede jord blev tilbagefyldt hvorved alle oprindelige sprækker og bioporer ned til den reducerede zone i morænelerlaget blev afbrudt. Den nedadrettede strømning i de øverste meter af jordsøjlen, har i de mellemliggende 15 år og frem til de seneste målinger dermed været begrænset til matrixstrømning og formentlig meget lille.

Udover de tidligere undersøgte pesticider omfatter de nye målinger også pesticiderne bentazon, 2,4-Dichlorobenzamid (BAM) og nedbrydningsprodukter af phenoxyherbiciderne og triazinerne. Herudover er foretaget aldersdatering af grundvandet ved analyser af tritium og CFC. Endvidere er der udført laboratorieforsøg med pesticidadsorption og udvaskning af pesticider fra intaktprøver af usprækket morænematrix udtaget fra "hot-spot" forureningen med de høje phenoxyherbicid koncentrationer /2/.

RESULTATER OG DISKUSSION

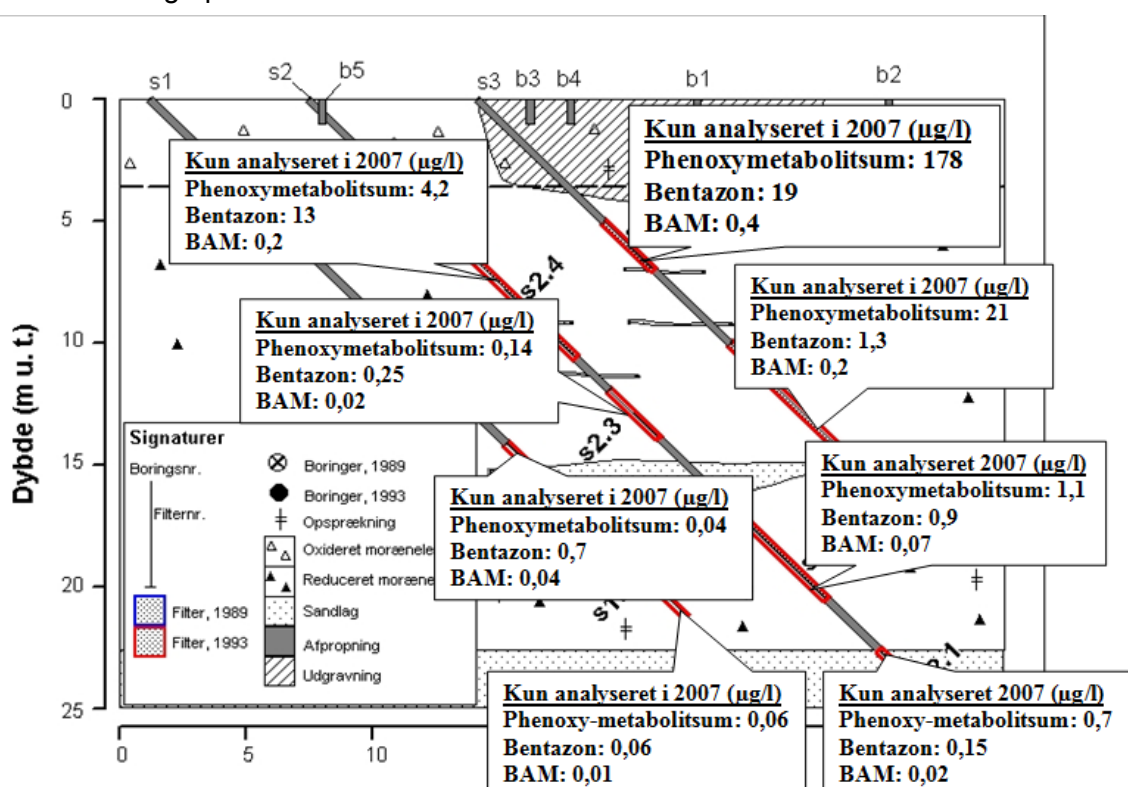
De nye undersøgelser i 2007 viser, at "hot-spot" forureningen på vaskepladsen stadig er beliggende omkring 5-7 m.u.t og dermed tilsyneladende kun i ringe grad har bevæget sig nedad mod grundvandet siden undersøgelsen 15 år tidligere, figur 2.



Figur 2. Pesticidanalyser i 1993/94 og i 2007 på vaskepladsen vist som gennemsnitskoncentrationer på de to tidspunkter i samme filtre. "Phenoxysum" repræsenterer summen af primært dichlorprop og MCPP samt sporadisk indhold af MCPA.

Som gennemsnitsværdier er koncentrationsfaldet i "hot-spot" ifht. i 1993/94 på 85 % for dichlorprop, 29 % for MCPP, 69 % for MCPA og 80 % for simazin. Der er betydelig variationsbredde på gentagelser af målingerne og for de tre sidstnævnte stoffer ligger koncentrationerne af de nyeste målinger indenfor variationsbredden af de tidligere målinger, hvormed den reelle størrelse af koncentrationsfaldene er usikker. I de underliggende filtre er koncentrationerne og fundhyppigheden af dichlorprop og MCPP på samme niveau som i 1993/94, mens både fundhyppigheden og koncentrationer generelt er faldet for MCPA og særligt simazin.

Udover de pesticider der indgik i den oprindelige analyseprogram er der i 2007 analyseret for og fundet bentazon, BAM samt en række metabolitter fra nedbrydning af primært phenoxyherbicider, figur 3. Det fremgår at disse har maksimum koncentrationer i forureningsfronten ligesom de øvrige pesticider.

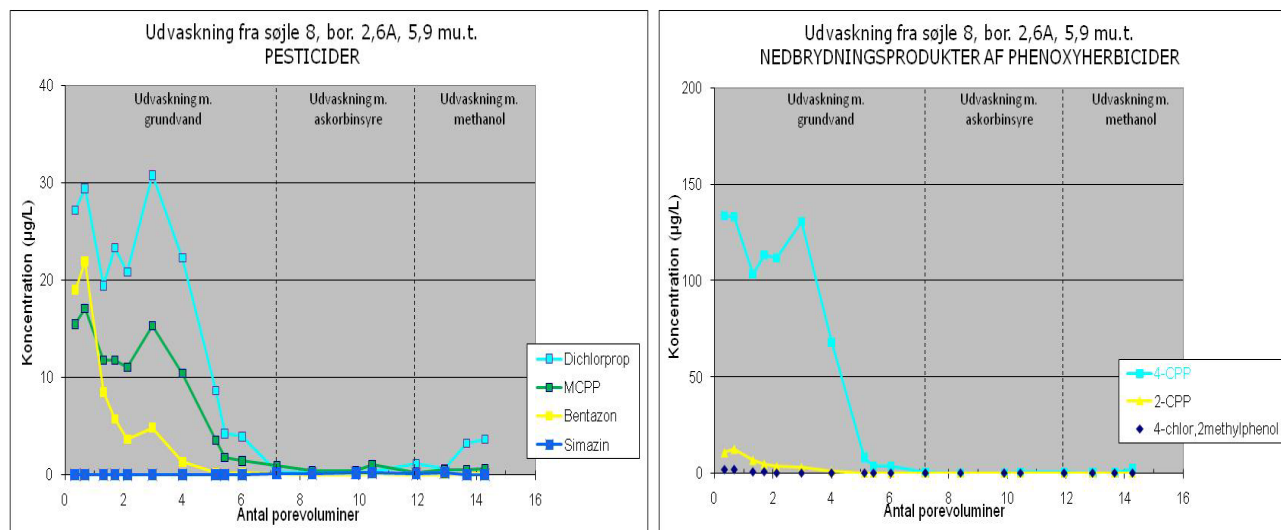


Figur 3. Nye stoffer medtaget i 2007 på vaskepladsen. "Phenoxy-metabolitsum" repræsenterer summen af primært 4-CPP og 2-CPP samt sporadisk indhold af 4-chlor, 2-methylphenol.

Udvaskningsforsøgene med intakt usprækket lermatrix viser, at de høje "hot-spot" koncentrationer af både pesticider og nedbrydningsprodukter findes akkumuleret i morænelermatrixen (figur 4) der har en meget lille, men typisk hydraulisk ledningsevne for moræneler ($10^{-10} - 10^{-9}$ m/s) /2/.

I kombination med den lille vertikale hydrauliske gradient under vaskepladsen peger dette på, at den observerede manglende bevægelse af forureningsfronten skyldes, at forureningen hovedsagligt er akkumuleret i det immobile matrixporevand, og dermed, at en dybere spredning af forureningen primært er betinget af diffusion af pesticiderne ud af matrix til evt. strømningsaktive sprækker eller tynde sandlag der går gennem "hot-spot". Når der findes

pesticidforurening gennem hele jordsøjlen under "hot-spot", inklusiv i grundvandsmagasinet under vaskepladsen, skyldes det således sandsynligvis hovedsagligt denne type transportveje i morænelerslaget.



Figur 4. Udvaskning af pesticider og metabolitter fra intakt søjle af moræneler udtaget fra boring 2.6A på vaskepladsen i 2007 (fig.1). Udvaskningen er foretaget i 3 trin med hhv. grundvand (pH= 7,6), grundvand tilsat askorbinsyre (pH = 3,3) og sidst fri fase methanol.

Som nævnt er koncentrationerne under "hot-spot" faldet op til cirka 1000 gange lavere end i "hot-spot". Disse lave koncentrationer er på samme niveau som for 15 år siden, hvilket er i overensstemmelse med antagelsen om, at der sker langsom tilbagediffusion af de akkumulerede pesticider i forureningsfronten til gennemgående strømningsaktive sprækker gennem "hot-spot" forureningen. Det skal dog bemærkes, at det målte vertikale forureningsprofil ikke med fuld sikkerhed kan påregnes som dækkende for den samlede pesticidnedsivning fra vaskepladsen pga. forureningens heterogene spredning i sprækker og tynde sandlag, der ikke nødvendigvis opfanges af boringsfiltrene. Denne problemstilling og deraf følgende usikkerhed mht. bedømmelse af grundvandspåvirkningen fra forureningskilder må regnes for generelt gældende ved monitorering af forureningsspredning i moræneler /3/.

KONKLUSION

I 1993/94 viste målingerne i "hot-spot" forureningen forekomst af sum-koncentrationer på op til næsten 1000 µg/l af phenoxherbicider, primært dichlorprop og MCPP og sekundært MCPA, som var ledsaget af diffuse lave koncentrationer omkring 1-5 µg/l af triaziner, primært simazin.

15 år senere viste målingerne, at gennemsnitskoncentrationerne i "hot-spot" var faldet 85 % for dichlorprop, 29 % for MCPP, 69 % for MCPA og 80 % for simazin. Den reelle størrelse af koncentrationsfaldene er dog usikker, da flere af de seneste koncentrationsmålinger ligger indenfor variationsbredden af de tidligere målinger.

Udover de pesticider der indgik i den oprindelige undersøgelse, er der i den seneste undersøgelse i 2007 analyseret for, og fundet, bentazon, BAM samt en række metabolitter fra nedbrydning af primært phenoxyherbicider. Den indikerede nedbrydning af phenoxyherbiciderne ud fra de målte koncentrationsfald af moderstofferne i "hot-spot" støttes af ledsagende høje koncentrationer af phenoxyherbicidmetabolitterne på 178 µg/l. Bentazon optrådte med ledsagende koncentrationer på 19 µg/l.

"Hot-spot" forureningen har stort set ikke bevæget sig siden undersøgelsen for 15 år siden, hvilket er i overensstemmelse med at hovedparten af forureningen er akkumuleret i immobilt porevand i morænematrixen samt endvidere med forekomsten af en lille vertikal hydraulisk gradient gennem lerlaget.

Pesticidkoncentrationerne under "hot-spot" er omkring 1000 gange lavere end i "hot-spot" og på samme niveau som for 15 år siden, hvilket er i overensstemmelse med en antagelse om, at der som den væsentligste spredningsmekanisme, sker langsom tilbagediffusion af de akkumulerede pesticider i matrix til gennemgående strømningsaktive sprækker gennem "hot-spot" forureningen.

Det bør ses som en generel teknisk udfordring ved forureningsundersøgelser i moræneler, at forureningsspredningen kan være heterogent fordelt i sprækker o.l. og dermed vanskelig at måle og monitere repræsentativt vha. konventionelle undersøgelsesmetoder.

REFERENCER

/1/ Miljøstyrelsen 2001. Point and Non-point Source Leaching of Pesticides in a till Ground-water Water Catchment. Miljøstyrelsens bekæmpelsesmiddelforskning.

/2/ Miljøstyrelsen 2011. En pesticidforurening 15 år senere – akkumulation, spredning og nedbrydning. Miljøstyrelsens pesticidforskningsprogram.

/3/ Jørgensen, P.R., K.E.S. Klint, J.P. Kistrup. Monitoring well interception with fractures in clayey till. Ground Water. Nov. – Dec. 2003, 772-779.

VALG AF AFVÆRGE MED INDDRAGELSE AF LIVSCYKLUSVURDERING (LCA)

Postdoc Gitte Lemming
Ph.d. studerende Julie Chambon
Professor Philip J. Binning
Professor Poul L. Bjerg
Institut for Vand og Miljøteknologi, DTU.

Professor Michael Z. Hauschild
Institut for Planlægning, Innovation og Ledelse, DTU

Scientific coordinator Manuele Margni
Scientific coordinator Cécile Bulle
The Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services
(CIRAIG), École Polytechnique de Montréal

ATV JORD OG GRUNDVAND

Risikovurdering af forurenede grunde i lavpermeable aflejringer
- udfordringer og metoder

Møde 18. januar 2012

RESUMÉ

Livscyklusvurdering (LCA) er anvendt til at sammenligne miljøeffekterne ved forskellige alternativer til at rense op på to forskellige TCE-forurenede grunde. De sammenlignede afværgealternativer for Lokalitet 1 er (i) in situ stimuleret reduktiv deklorering, (ii) in situ termisk desorption og (iii) bortgravning, ekstern rensning og deponering. Disse tre alternativer er sammenlignet med basisscenariet, hvor der ikke renses aktivt op, men blot monitoreres. For Lokalitet 2 er følgende afværgemetoder sammenlignet: (i) in situ stimuleret reduktiv deklorering og (ii) in situ kemisk oxidation. Disse alternativer er igen sammenlignet med et basis-scenarium, hvor der ikke renses op, men blot monitoreres. Desuden er der inkluderet et scenarium, hvor der i stedet for at blive renses op i kilden behandles med aktivt kul på vandværket. Resultaterne viser overordnet set, at biologisk oprensning med in situ reduktiv deklorering er den teknik, der har de laveste miljøpåvirkninger. Til gengæld har denne teknik en lang tidsramme og kan give toksiske påvirkninger af grundvandet grundet udsivning af vinylchlorid, som er et mellemprodukt i den reduktive deklorering.

INDLEDNING

Ved valg af afværgemetoder til oprensning af forurenede jord og grundvand er der i stigende grad fokus på at vælge teknikker, som samlet set giver de laveste miljøpåvirkninger på den lokale, regionale og globale skala. I den sammenhæng er livscyklusvurdering (Life Cycle Assessment - LCA) et vigtigt beslutningsstøttetværktøj, som netop har til formål at opgøre miljøbelastninger relateret til en given funktion eller service. Metoden er kendetegnet ved, at der ses på miljøbelastninger relateret til den fulde livscyklus af servicen samt alle materiale- og energiforbrug herfra. En litteraturgennemgang af LCA anvendt inden for dette felt er tidligere givet i /1/.

Primære og sekundære miljøeffekter

Ved oprensning af en forurenede grund fjernes der en lokal forurening. På samme tid genereres der miljøpåvirkninger på den lokale, regionale og globale skala som følge af afværgeaktiviteterne og deres forbrug af energi og materialer. I forbindelse med anvendelse af LCA ved vurdering af afværgetiltag for forurenede grunde kan der derfor skelnes mellem to typer af miljøeffekter, henholdsvis primære og sekundære effekter /2/. De primære effekter betegner potentielle miljøpåvirkninger, som forureningen i sig selv forårsager på lokaliteten som følge af dens spredning i luft, vand- og jordmiljøer. De sekundære effekter knytter sig derimod til selve det teknologiske system - altså alle aktiviteter, der bidrager til at afværge den forurenede grund.

FORMÅL

Formålet med denne artikel er at anvende LCA til vurdering af miljøeffekterne relateret til oprensning af to TCE-forurenede grunde. For begge lokaliteter gælder det, at forureningens kildeområde forefindes i en opsprækket moræneler, som ligger over et primært grundvandsmagasin, hvorfra der indvindes drikkevand. Artiklen sammenfatter arbejder, der delvis er beskrevet i Lemming et al. (2010) /3/ og i Westergaard et al. (2011) /4/.

De sammenlignede afværgealternativer for lokalitet 1 er (i) in situ stimuleret reduktiv deklorering, (ii) in situ termisk desorption og (iii) bortgravning, ekstern rensning og deponering. Disse tre alternativer er sammenlignet med basisscenariet, hvor der ikke renses aktivt op, men blot monitoreres. For lokalitet 2 er følgende afværgemetoder sammenlignet: (i) (i) in situ stimuleret

reduktiv deklorering og (ii) in situ kemisk oxidation. Disse alternativer er igen sammenlignet med et basisscenarium, hvor der ikke renses op, men blot monitoreres. Derudover sammenlignes der med et scenarium, hvor der behandles med aktivt kul på vandværket i stedet for at rense kilden op. Se tabel 1 og 2 for en oversigt over de væsentligste aktiviteter indeholdt i de forskellige afværgealternativer.

For at kunne opgøre alle forbrug relateret til de forskellige afværgescenarier er det nødvendigt at kende tidsrammen for de forskellige teknologier. For scenarierne med lang tidsramme (monitoring, stimuleret reduktiv deklorering og kemisk oxidation) er der derfor foretaget modelberegninger i Comsol Multiphysics for at vurdere oprensningstiderne i den opsprækkede moræneler. Denne model er samtidig brugt til at estimere udsivningen af forureningsstoffer (TCE og nedbrydningsprodukter) til det primære grundvandsmagasin og derudfra at vurdere de primære toksiske effekter relateret til de forskellige afværgescenarier. For de øvrige afværgescenarier (termisk oprensning og afgravning) vil oprensningen gå relativt hurtigt (< 3 måneder), hvorfor der ses bort fra primære toksiske effekter for disse afværgeteknikker.

METODE

Numerisk modellering af tidsrammer og primære effekter af afværge

En numerisk model, der inkluderer forureningstransport i det opsprækkede medium ved en kombination af diffusionsstyret transport i lermatricen og advektionsstyret transport i spræk-kern udviklet af Chambon et al. /5,6/ er anvendt til at estimere tidshorisonterne for scenarierne med lang tidshorizont (SRD, ISCO og monitoring). Modellen inkluderer desuden mikrobiel nedbrydning af TCE via anaerob reduktiv deklorering beskrevet ved Monod kinetik.

Udover at estimere fjernelse af forureningsmassen over tid, estimeres desuden massefluxen til grundvandsmagasinet over tid og de forventede nedstrøms koncentrationer (100 meter nedstrøms kildeområdet). Massefluxen benyttes endvidere til at estimere forureningskoncentrationerne i det indvundne grundvand på vandværkerne, som er truet af de to forurenede lokaliteter. Dette gøres ud fra en antagelse om, at der ikke sker yderligere nedbrydning af forureningen under transporten i grundvandsmagasinet eller ved vandbehandlingen på vandværket.

Reaktionszoner og nedbrydningsrater

Der er forudsat forskellige fremgangsmåder til injektion af reaktanter til moræneleren for de to lokaliteter. På lokalitet 1 (Gl. Kongevej) antages injektionen at foregå ved direct push injektion med geoprobe for hver 25 cm's dybde i moræneleren. For lokalitet 2 (Sortebrovej) antages injektionen at foregå ved gravitation i permanente injektionsboringer.

På begge lokaliteter er afværge med stimuleret reduktiv deklorering igangsæt og de valgte injektionsmetoder svarer til de faktisk benyttede metoder på lokaliteterne.

Kerneprøver udtaget i forbindelse med feltafprøvninger af SRD i moræneler har vist, at den mikrobielle nedbrydning kun kan forventes at forløbe i smalle reaktionszoner med en total udstrækning på 5-10 cm omkring injektionsdybderne /7,8/.

For Gl. Kongevej er der derfor foretaget følgende antagelser omkring reaktionszonerne:

- **Monitoringsscenarium:** Naturlig nedbrydning via reduktiv deklorering er observeret på lokaliteten inden igangsætning af afværge. Det antages, at den naturlige nedbryd-

ning finder sted i en zone med en total udstrækning på 10 cm omkring de naturligt forekommende vertikale sprækker i moræneleren

- **SRD scenarium:** Det antages, at reduktiv deklorering foregår i 10 cm zoner omkring injektionsdybderne. Dvs. for hver meters dybde er der fire horisontale reaktionszoner med en dybde på 10 cm.

For Sortebrovej er der ikke observeret betydelig naturlig nedbrydning inden opstart af afværge. Der er foretaget følgende antagelser omkring reaktionszonernes udstrækning:

- **Moniteringsscenarium:** Det antages, at der ikke foregår naturlig nedbrydning på lokaliteten.
- **SRD scenarium:** Da tilsætningen af substrat og bakterier er sket ved gravitation i eksisterende borer antages det, at det migrerer ind i de vertikal højerpermeable indslag (sandslirer) i moræneleren. Ud fra boreprofilerne er det vurderet, at der i gennemsnit forekommer et af disse indslag per meters dybde. På baggrund af kerneprøver udtaget fra lokaliteten /7/ er reaktionszonen vurderet til at have en total udstrækning på 5 cm omkring de højerpermeable sandslirer, dvs. for hver meters dybde er der 5 cm reaktionszone.
- **ISCO scenarium:** Tilsætning af oxidant antages at ske ved gravitation ligesom for SRD. På baggrund af kerneprøveresultater fra en lignende lokalitet /9/ er det vurderet, at kaliumpermanganat vil trænge ind i en zone på 10 cm omkring de højerpermeable slirer. For hver meters dybde er der i dette scenarium derfor 10 cm reaktionszone.

Udbredelsen af reaktionszoner er en vigtig parameter i forhold til at vurdere tidshorisonten for oprensningen i moræneler /10/, da denne har indflydelse på forureningens diffusionsafstand fra lermatrice til reaktionszone, som kan blive styrende for oprensningstiden grundet den langsomme hastighed af diffusionsprocessen.

Herudover er nedbrydningsraten (koncentrationen af biomasse) en vigtig parameter. For Gl. Kongevej blev nedbrydningsraten for SRD fastsat ud fra den målte biomassekoncentration ved den faktiske afværge. For det naturlige nedbrydningsscenarium blev nedbrydningsraten vurderet til at være en faktor 20 lavere ud fra en kalibrering med observerede koncentrationer af nedbrydningsprodukter inden afværgen blev initieret. For Sortebrovej blev der anvendt to forskellige nedbrydningsrater, dels den samme som for Gl. Kongevej og dels en hurtigere rate baseret på kalibrering med feltdata /7/.

Livscyklusvurderingsmetode og -opgørelse

Den anvendte livscyklusvurderingsmetode er EDIP2003 /11/ for kategorierne global opvarmning, ozondannelse, forsuring og eutrofiering. Kategorien "partikelforurening" er inkluderet som en indikator for respiratoriske effekter associeret med partikelforurening ($PM_{2-10\mu m}$, $PM_{<2.5\mu m}$) og uorganiske stoffer (NO_x , SO_2 , and NH_3) /12/. For de toksiske effekter (human- og økotoksicitet) er USEtoxTM-modellen anvendt /13/

De estimerede miljøpåvirkninger vil i denne artikel blive præsenteret som normaliserede effekter udtrykt i personækvivalenter (PE). 1 PE repræsenterer den gennemsnitlige årlige

belastning fra en europæer/verdensborger i 2004 for henholdsvis regionale/globale miljøpåvirkninger.

Udvekslinger relateret til baggrundssystemet (produktion af stål, elektricitet, plastik, kaliumpermanganat etc; transportprocesser) er baseret på ecoinvent databasen version 2.0 /14/. Disse data er suppleret med indsamling af mere afværge-specifikke data, som ikke er indeholdt i generelle LCA-databaser. Disse specifikke data inkluderer data fra producenter og leverandører (biokultur til SRD, produktion af aktivt kul), fra laboratoriepraktis (jord- og grundvandsanalyser) og data om el-/brændstofforbrug til diverse on- og off-site aktiviteter fra entreprenører (brøndboring, injektion af substrat/oxidant, installation af spunsvæg, afgravning og genfyldning, jordtransport og jordbehandling, termisk opvarmning). Elektricitet anvendt i afværgeprojekternes driftsfase antages at svare til gennemsnitlig dansk elproduktion inklusiv import fra udlandet. Al stål (almindelig stål og rustfri stål) antages at være produceret af genbrugsstål (90%) og primær stål (10%). For komponenter med lang levetid (fx spunsvæg og varmelementer) er det vurderet hvor mange projekter de kan genbruges på og kun en andel af materialeforbruget er derfor allokeret til oprensings-projektet.

I SRD scenarierne er forbruget af substrat (elektronacceptor) estimeret ud fra indholdet af elektronacceptorer i kildeområdet (fastsiddende og fornybare samt mængden af forurening). I ISCO scenariet er forbruget af oxidanten (kaliumpermanganat) estimeret ud fra jordens naturlige oxidantforbrug (NOD, natural oxidant demand) bestemt for laboratorieforsøg med materialer fra lokaliteten /15/. For begge teknologier er der regnet med en sikkerhedsfaktor på 2 ved estimeringen af forbruget af substrat/oxidant.

Den potentielle produktion af methan ved den anaerobe omsætning af substratet er estimeret og inkluderet som en atmosfærisk emission i LCA opgørelsen. For kemisk oxidation er produktionen af CO₂ ved oxidation af jordens organiske materiale ligeledes inkluderet som en emission i opgørelsen.

Tabel 1 og 2 viser en oversigt over de vigtigste aktiviteter indeholdt for hver af de vurderede afværgeteknikker for de to lokaliteter.

Tabel 1 – Vigtigste aktiviteter inkluderet for de alternative scenarier for lokalitet 1 (Gl. Kongevej)

Monitering	Stimuleret reduktiv deklorering (SRD)	In situ termisk desorption (ISTD)	Afgravning med ekstern rensning og deponering
- Monitering af grundvand (person transport, prøveudtagning og laboratorieanalyse)	- Installation af ekstra monitoringsboringer - Pumpning og injektion af melasse og biokultur - Monitering af jord og grundvand - Transport af materialer, udstyr og personer	- Installation af varme- og ekstraktionsboringer, varmelementer og topafdækning - Opvarmning og ventiler af jord - Aktiv kulbehandling - Monitoring of soil - Transport af materialer, udstyr og personer	- Installation og optagning af spunsvæg - Afgravning og genfyldning - Jordtransport - Monitering af jord - Jordbehandling ved mileudlægning og vending - Jorddeponering - Transport af materialer, udstyr og personer

Tabel 2 – Vigtigste aktiviteter inkluderet for de alternative scenarier for lokalitet 2 (Sortebrovej)

Monitering	Stimuleret reduktiv deklorering (SRD)	In situ kemisk oxidation (ISCO)
- Monitering af grundvand (person transport, prøveudtagning og laboratorieanalyse)	- Installation af injektionsboringer - Pumpning og injektion af emulgeret sojabønneolie og biokultur - Monitering af jord og grundvand - Transport af materialer, udstyr og personer	- Installation af injektionsboringer - Pumpning og injektion af kaliumpermanganat - Monitering af jord og grundvand - Transport af materialer, udstyr og personer

RESULTATER OG DISKUSSION

Oprensningstider og primære toksiske effekter

Ved hjælp af modellen er oprensningstiden for de alternative afværgescenarier estimeret for begge lokaliteter. Denne er defineret som tidshorisonten for fjernelse af 98% af forureningsmassen i kildeområdet for Gl. Kongevej og 99% for Sortebrovej. For begge lokaliteter er den nødvendige fjernelse fastsat ud fra et ønske om at overholde grundvands-kvalitetskriterierne 100 m nedstrøms forureningskilden. På baggrund af de estimerede forureningsfluxe til grundvand er mængderne af forurening (TCE samt nedbrydningsprodukter) som siver ud til grundvandet estimeret, samt de resulterende koncentrationer i det grundvand, der invindes på de to truede vandværker.

Resultaterne for Gl. Kongevej er opsummeret i tabel 3. For denne lokalitet vil det uden oprensning tage ca. 1200 år at opnå den ønskede massefjernelse ved den naturlige nedbrydning, mens oprensningstiden vil reduceres til ca. 40 år, hvis den reduktive deklorering bliver stimuleret ved tilsætning af elektron donor og specifikke bakterier. Som det ses af tabellen, vil den udvaskede mængde af TCE og DCE til grundvandet blive reduceret væsentligt, mens mængden af VC kun reduceres i meget begrænset omfang. Den toksiske effekt (de primære effekter) forbundet med denne udsivning/udledning til grundvandet er dermed også kun reduceret i begrænset omfang (med ca. 20%), da VC er langt mere toksisk end TCE og DCE, og udledningen af VC dermed bliver styrende for de primære toksiske effekter.

For de øvrige afværgescenarier for Gl. Kongevej (termisk oprensning og afgravning) sker der en hurtig fjernelse (< 3 måneder) af kildeområdet og opnåelse af den ønskede forureningsreduktion. Der vil dermed ikke være primære toksiske effekter forbundet med disse afværgeteknikker.

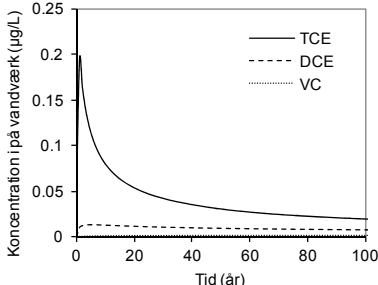
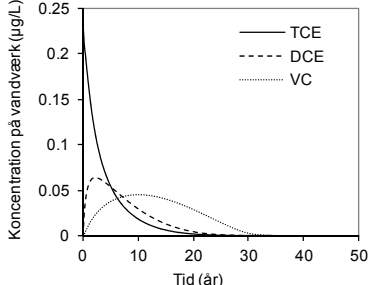
For Sortebrovej (se opsummering af modelresultater i tabel 2) vil det tage ca. 700 år før den ønskede massefjernelse opnås såfremt der ingen aktiv afværge sker og i den periode vil ca. 22 kg TCE sive ud til grundvandet. Stimuleret reduktiv deklorering vil på denne lokalitet tage længere tid end på Gl. Kongevej. Det skyldes især, at injektionen sker ved gravitation, og at der dermed kun antages at være 1 reaktionszone per meter. Desuden er reaktionszonerne som tidligere nævnt smallere for denne lokalitet. Afhængig af nedbrydningsraten, vil det derfor tage mellem ca. 90 og 200 år at få reduceret kildekonzentration tilstrækkeligt.

Oprensningstiden for kemisk oxidation vil ligesom for SRD være styret af den store diffusionsafstand fra lermatrix ud til reaktionszonerne og det kan forventes at tage ca. 80 år at rense op med denne teknik.

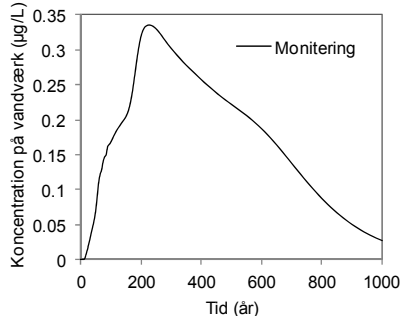
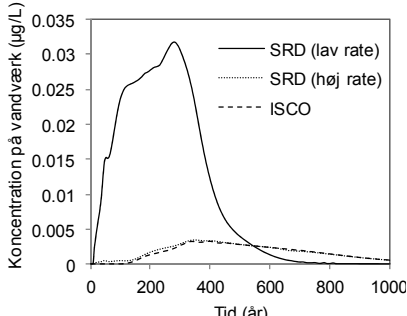
Det ses desuden af modelresultaterne for Sortebrovej, at der ved oprensning med SRD er risiko for udsivning af væsentlige mængder af VC, såfremt nedbrydning forløber med den lave rate. Dette betyder, at de primære humantoksiske effekter for dette SRD scenarium er mere end fordoblet i forhold til monitoringscenariet, hvor der ikke sker aktiv oprensning af kilden og hvor hele TCE-forureningen med tiden ender i grundvandet.

Som nævnt ovenfor er det for Sortebrovej antaget, at der ikke sker en naturlig nedbrydning af TCE. I SRD scenariet med den høje nedbrydningsrate samt i ISCO scenariet sker der ingen væsentlig udsivning af klorerede stoffer til grundvandet, og de primære toksiske effekter er dermed negligerbare.

Tabel 3. Opsummering af væsentligste resultater fra modelleringen af scenarierne med henholdsvis monitoring og stimuleret reduktiv deklorering for Gl. Kongevej.

	Monitoring	Stimuleret reduktiv deklorering (SRD)
Tidshorisont for 98% massefjernelse (modelestimeret)	Ca. 1200 år	Ca. 40 år
Udsivning (kg) til grundvand		
TCE	21	2.1
DCE	8.8	1.6
VC	2.4	2.2
Koncentrationer (µg/L) i indvundet drikkevand		
Primære effekter (PE)		
Humantoksicitet (non-carc.)	25	20
Humantoksicitet (carcinogen)	78	61
Sum	103	81

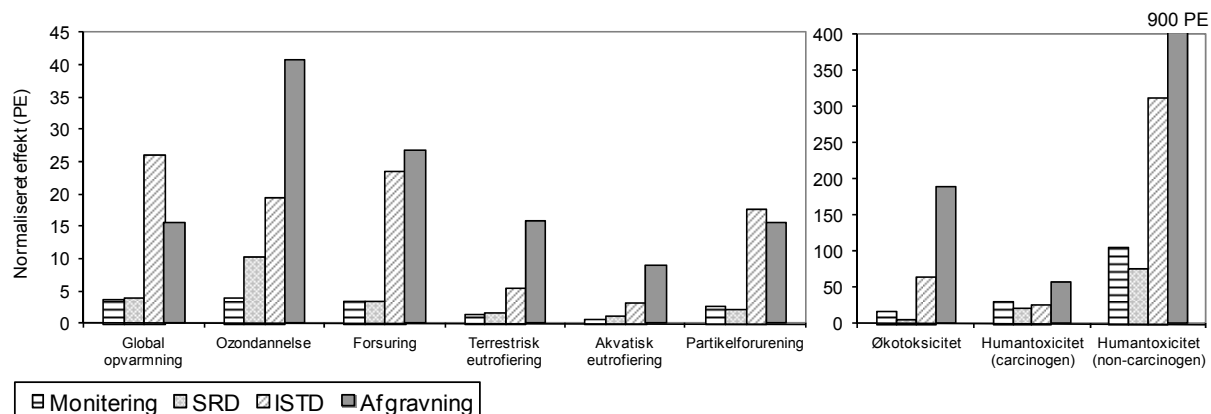
Tabel 4. Opsummering af væsentligste resultater fra modelleringen af scenarierne med henholdsvis monitoring, stimuleret reduktiv deklorering og kemisk oxidation for Sortebrovej

	Monitoring	Stimuleret reduktiv deklorering (SRD)		In situ kemisk oxidation (ISCO)
		Høj rate	Lav rate	
Tidshorisont for 99% massejernelse (model estimeret)	Ca. 700 år	Ca. 90 år	Ca. 200 år	Ca. 80 år
Udsivning (kg) til grundvand				
TCE	23	0.21	0.048	0.007
DCE		0.023	0.27	
VC		0.0072	1.1	
Koncentrationer (µg/L) i indvundet drikkevand (talt koncentrationer)	Monitoring:	SRD og ISCO:		
				
Primære effekter (PE)				
Humantoksicitet (non-carc.)	n/a	0.1	7.5	n/a
Humantoksicitet (carcinog.)	15	0.4	35	0.15
Sum	15	0.5	42.5	0.15

Sekundære effekter

Figur 1 viser LCA-resultaterne for de fire scenarier for Gl. Kongevej. Det skal bemærkes at figuren indeholder både primære og sekundære humantoksiske effekter. Det ses, at for de fleste miljøeffekter har SRD en påvirkning i samme størrelsesorden som monitoringsscenarioet, dog især undtaget stratosfærisk ozondannelse, hvor den potentielle produktion af metan under fermenteringen af elektrondonoren giver et høj bidrag. Derimod er de toksiske effekter relateret til SRD lavere end for monitoring, hvilket især skyldes reduktionen i de primære effekter som følge af oprensningen. Forskellen er dog relativt begrænset.

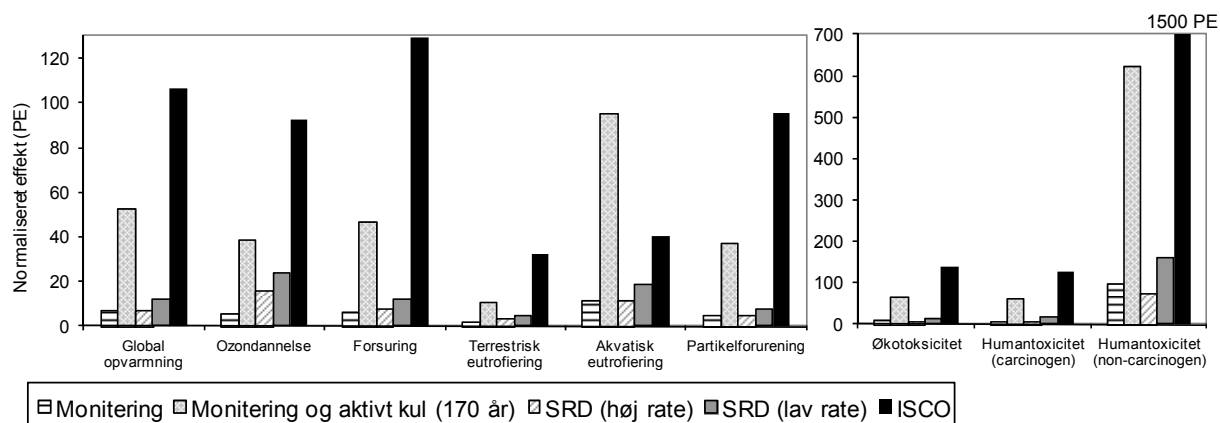
Sammenlignet med SRD og monitoring giver termisk oprensning (ISTD) og afgravning langt højere miljøeffekter i alle kategorier. ISTD er den teknik, der giver det højeste bidrag til global opvarmning, mens afgravning har de højeste effekter indenfor især ozondannelse, eutrofiering og øko- og humantoksiske effekter. Det skal bemærkes at ISTD og afgravning i modsætning til monitoring og SRD ikke giver anledning til primære toksiske effekter (lokale toksiske påvirkninger af grundvandet). De høje toksiske effekter relateret til disse teknikker skyldes derfor emissioner opstrøms i systemet, dvs. under råstofudvindelsen og produktionen af de anvendte materialer og energityper.



Figur 1. Normaliserede miljøeffekter i PE (personækvivalenter) for de fire afværgescenarier for Gl. Kongevej. Bemærk at de humantoksiske effekter for Monitoring og SRD inkluderer de primære toksiske effekter grundet udsivning til grundvandet (se tabel 3)

LCA-resultaterne for Sortebrovej ses af figur 2. Det ses, at de laveste miljøeffekter opnås for monitoringsscenarioet samt scenarioet for SRD med høj rate. Med den lave nedbrydningsrate stiger effekterne fra SRD med 40-100% afhængig af hvilken effekt der kigges på. Det er dog afværgescenarioet med kemisk oxidation, som giver langt de højeste sekundære miljøeffekter (gennemsnitligt en faktor 8 højere end SRD med lav rate). De høje miljøeffekter relateret til ISCO scenarioet skyldes især produktionen af den store mængde af kaliumpermanaganat, der anvendes til oprensningen.

Monitoringsscenarioet fører til en overskridelse af grundvandskvalitetskriteriet for TCE i en lang årrække fremover i det primære grundvand 100 meter nedstrøms kilden med koncentrationer op til 5 µg/L. Koncentrationerne i det indvundne drikkevand på kildepladsen forventes derimod ikke at overstige kvalitetskriteriet, da der sker opblanding med uforurenat vand. Dog er der stadig tale om betydelige koncentrationer (op til 0.35 µg/L, jf. tabel 4). Såfremt, der er andre kilder til TCE forurening i oplandet til det pågældende vandværk, vil dette være et væsentligt bidrag til at overskride kvalitetskriteriet på 1 µg/L. Der er derfor regnet på et alternativt scenarium, hvor der i tillæg til monitoring også sker rensning af det indvundne grundvand på vandværket ved hjælp af aktivt kul. Rensning med aktivt kul vil foruden brug af aktivt kul medføre en forøgelse af elforbruget på vandværket. Dette skyldes den ekstra pumpning af vandet gennem kulfilteret samt den efterfølgende UV-behandling. Som det ses af figur 2 giver kulfiltrering anledning til at effekterne fra monitoringsscenarioet øges med en faktor 7 i gennemsnit. Dette skyldes helt overvejende det ekstra elforbrug på vandværket og i mindre grad produktionen af det aktive kul. I beregningen er det antaget, at denne forurenede grund kun bidrager til en del af det totale elforbrug på vandværket, nemlig den del der går til at behandle det volumen grundvand (23 mio. m³), som forureningsmassen fra lokaliteten vil forurene, hvis det blandes op til 1 µg/L. Med en årlig indvindingsrate på 133.000 m³ svarer dette elforbrug til at holde rensningen med aktivt kul kørende i en periode på 170 år. Ud fra resultatet af LCA beregningene med monitoring og aktiv kulrensning tyder resultaterne på, at afværge i kilden med SRD vil være at foretrække fremfor at behandle vandet på vandværket med aktivt kul. Selvom miljøeffekterne stiger væsentligt når rensning med aktivt kul tilføjes til monitoringsscenarioet, så er effekterne dog stadig lavere end for afværgescenarioet med kemisk oxidation.



Figur 2. Normaliserede miljøeffekter i PE (personækvivalenter) for de fire afværgescenarier for GI. Kongevej samt et scenarium med monitoring og rensning med aktivt kul på vandværket. Bemærk at de humantoksiske effekter inkluderer de primære toksiske effekter grundet udsivning til grundvandet (se tabel 4).

KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

Oprensning af en forurenede grund fjerner en lokal forurening (primære effekter), men skaber samtidig miljøeffekter (sekundære effekter) på den lokale, regionale og globale skala. Resultaterne for de to TCE-forurenede morænelerslokaliteter indeholdt i denne artikel viser, at stimuleret reduktiv deklorering er den teknologi, der har de laveste sekundære miljøpåvirkninger grundet det forholdsvis begrænsede forbrug af materialer og energi. I sammenligning med SRD falder både kemisk oxidation, in situ termisk desorption, afgravning med ekstern jordbehandling og rensning med aktivt kul på vandværket betydeligt dårligere ud. Resultatet for scenariet med aktiv kulbehandling vil afhænge af hvor mange øvrige kilder til forurening, der findes i det pågældende indvindingsopland og hvorledes byrden fra kulfiltreringen fordeles mellem disse forureningskilder.

Ulempen ved SRD er, at oprensningstiden er meget lang for lavpermeable aflejringer. Derudover er der risiko for at nedbrydningen forløber så langsomt, at betydelige mængder af nedbrydningsproduktet vinylchlorid udsiver til grundvandet. Denne situation er meget uønsket, grundet den høje toksicitet af vinylchlorid og kan i worst case situationen betyde, at den toksiske udledning til grundvandet forøges som følge af afværgen i forhold til udgangssituationen.

Ved opgørelse af begge typer af effekter (primære og sekundære effekter) fra afværgescenarierne i personækvivalenter, er det tydeligt, at der samlet set genereres flere effekter end der fjernes ved afværgen. Det kan derfor diskuteres, om der samlet set er en miljøgevinst ved oprensningen af de pågældende lokaliteter (forudsat, at der ikke skal iværksættes en behandling med aktivt kul på vandværket). Dette vil desuden afhænge af, hvordan de lokale effekter vægtes i forhold til de mere regionale og globale miljøeffekter. Det kan bemærkes, at miljøvurderingen ved brug af LCA ikke er en bæredygtighedsvurdering, da den ikke medtager de sociale og økonomiske påvirkninger, der følger af et afværgeprojekt, men som også kan have stor betydning for valget af afværgeteknik.

ACKNOWLEDGEMENT

Region Syddanmark takkes for at finansiere dele af arbejdet med livscyklusvurderingen for Sortebrovej. Endvidere takkes Region Syddanmark og Region Hovedstaden for at stille data for de to lokaliteter til rådighed og en lang række firmaer takkes for at bidrage til livscyklusopgørelserne.

REFERENCER

- /1/ Lemming G.; Hauschild M.; Bjerg P. L. Livscyklusvurdering (LCA) som beslutningsstøtte ved valg af afværgemetoder. 2010, Vintermøde om jord- og grundvandsforurening, Vingsted-centret 9.-10 marts, 2010.
- /2/ Volkwein S.; Hurtig H. W.; Klöpffer W. LCA Concepts and Methods - Life Cycle Assessment of Contaminated Sites Remediation. *International Journal of Life Cycle Assessment* 1999, 4 (5), 263-273.
- /3/ Lemming G.; Hauschild M. Z.; Chambon J.; Binning P. J.; Bulle C.; Margni M.; Bjerg P. L. Environmental Impacts of Remediation of a Trichloroethene-Contaminated Site: Life Cycle Assessment of Remediation Alternatives. *Environmental Science & Technology* 2010, 44 (23), 9163-9169.
- /4/ Westergaard C.; Lemming G.; Janniche G. S.; Chambon J.; Binning P. J.; Broholm M. M.; Bjerg P. L.; Christophersen M.; Petersen J. Monitoring, modellering og miljøvurdering af fuld-skala afværge af TCE fourening ved stimuleret reduktiv deklorering. 2011, Region Syddanmark, 2011.
- /5/ Chambon J.; Lemming G.; Broholm M. M.; Binning P. J.; Bjerg P. L. Model assessment of reductive dechlorination as a remediation technology for contaminant sources in fractured clay: Case studies. 2009, Delrapport III. Miljøprojekt 1296, Miljøstyrelsen.
- /6/ Chambon J.C.; Broholm M. M.; Binning P. J.; Bjerg P. L. Modeling multi-component transport and enhanced anaerobic dechlorination processes in a single fracture-clay matrix system. *Journal of Contaminant Hydrology* 2010, 112 (1-4), 77-90.
- /7/ Manoli G.; Chambon J.; Broholm M. M.; Scheutz C.; Binning P. J.; Bjerg P. L. A Remediation Performance Model for Enhanced Metabolic Reductive Dechlorination of Chloroethenes in Fractured Clay Till. *Journal of Contaminant Hydrology* 2011, (in review).
- /8/ Scheutz C.; Durant N.; Dennis P.; Hansen M. H.; Jørgensen T.; Jakobsen R.; Cox E.; Bjerg P. L. Concurrent Ethene Generation and Growth of Dehalococcoides Containing Vinyl Chloride Reductive Dehalogenase Genes During an Enhanced Reductive Dechlorination Field Demonstration. *Environmental Science & Technology* 2008, 42 (24), 9302-9309.
- /9/ Broholm M.M.; Hønning J.; Bjerg P. L. Kemisk oxidation med permanganat. Omsætningshastigheder og spredning i moræneler. 2006, Miljøprojekt Nr. 1066 2006. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen.
- /10/ Chambon J.; Lemming G.; Manoli G.; Broholm M. M.; Christophersen M.; Binning P. J.; Bjerg P. L. Design Requirements for ERD and ISCO: how close and how fast to achieve an effective remediation? 2011, Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer - It's a contact sport! ATV Jord og Grundvand, 74, pp. 21-32, 2011. Kgs. Lyngby.

- /11/ Hauschild M.Z.; Potting J. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. 2005, Environmental news No. 80 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- /12/ Humbert S; Marshall J; Shaked S; Nishioka Y; Preiss P; Spadaro J; Horvath A; Jolliet O. In-take fractions and characterization factors for particulate matter: review and recommendations (in review). 2009.
- /13/ Rosenbaum R.K.; Bachmann T. M.; Gold L. S.; Huijbregts M. A. J.; Jolliet O.; Juraske R.; Koehler A.; Larsen H. F.; MacLeod M.; Margni M.; McKone T. E.; Payet J.; Schuhmacher M.; van de Meent D.; Hauschild M. Z. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2008, 13 (7), 532-546.
- /14/ Frischknecht R.; Jungbluth N.; Althaus H.-J.; Doka G.; Dones R.; Heck T.; Hellweg S.; Hischer R.; Nemecek T.; Rebitzer G.; Spielmann M.; Wernet G. Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1. 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- /15/ Hønning J.; Bjerg P. L. Kemisk oxidation. Laboratorieforsøg - Sortebrovej. 2003, Miljø og Resourcer DTU. Technical University of Denmark.

